

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MODÉLISATION DE L'ADHÉRENCE DE LA GLACE  
ATMOSPHERIQUE SUR DIVERS SUBSTRATS**

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

Comme exigence partielle du programme de maîtrise en ingénierie  
Pour l'obtention du grade de Maître ès sciences appliquées  
(M. Sc. A.)

Par  
FRÉDÉRIC GUÉRIN  
B. Sc.

FÉVRIER 2014

## RÉSUMÉ

C'est afin de mieux comprendre l'adhésion de la glace atmosphérique sur un substrat qu'un modèle mathématique a été fait prenant en considération l'existence d'une couche amorphe présente à la surface d'un cristal de glace. L'existence de cette couche amorphe, dite couche semi-liquide, a été suggérée en 1859 par le physicien britannique Michael Faraday lors de ses études sur la glace ayant pour objectifs d'expliquer le caractère glissant de la glace comparativement aux autres cristaux. Le modèle mathématique présenté dans ce mémoire a comme premier postulat que la couche semi-liquide est la cause principale de l'adhésion de la glace sur les matériaux et que c'est par la force d'adhésion capillaire qu'elle adhère aux matériaux. C'est en utilisant cette approche qu'une équation a été trouvée permettant de calculer la contrainte limite en cisaillement qu'il est nécessaire d'appliquer sur un morceau de glace atmosphérique ayant été accrétié sur un substrat afin de le faire détacher de celui-ci. Cette équation met en relation les conditions de givrage, les paramètres de surface du substrat, la dimension des gouttelettes d'eau surfondues présentes à l'intérieur du nuage atmosphérique ainsi que le temps de nucléation d'une gouttelette d'eau surfondue lors de son impact avec le substrat. Afin de vérifier la validité de ce modèle, des essais en chambre climatique et en soufflerie réfrigérée permettant de recréer les conditions atmosphériques de givrage ont été effectués. Les essais en chambre climatique ont pour objectifs d'obtenir des valeurs de la contrainte de cisaillement critique de la glace atmosphérique en fonction de la température pour trois types de matériaux, soient, l'aluminium 6061-T6, l'aluminium gravé chimiquement et un revêtement hydrophobe, le Wearlon®, et de permettre la validation du modèle d'adhésion. Les valeurs de cisaillement critique sont obtenues en utilisant le *Centrifuge Adhesion Test* (CAT). Ces essais permettent également de vérifier l'impact de la température d'accrétion de la glace versus la température lors de l'essai de détachement. Deux séries d'essais ont donc été effectuées en chambre climatique. La première série utilise une accrétion de la glace à une température de -8 °C alors que les essais de cisaillement sont effectués à différentes températures, soit, -5, -8, -10, -13, -15 et -20 °C. Pour la deuxième série d'essais, la température d'accrétion et les tests de cisaillement critique sont effectués à -5, -10, -13, -15,

-20 et -25 °C. Les tests en soufflerie réfrigérée sont quant à eux effectués en utilisant le *Spinning Rotor Blade* (SRB). Contrairement aux tests avec le CAT, les essais avec le SRB nécessitent de connaître la contrainte en tension critique en cohésion de la glace. C'est pourquoi les essais avec la soufflerie réfrigérée sont effectués afin de comparer le modèle et non de le valider. Les accrétions de glace sont effectuées à des températures de -5, -10, -15, -20 et -25 °C pour deux vitesses de rotation, soient, 3200 et 1600 RPM. Les substrats utilisés sont l'aluminium 6063-T6, l'aluminium gravé chimiquement et le Wearlon®. Les résultats obtenus pour les 99 essais de CAT montrent l'importance de la température d'accrétion de la glace versus celle de délestage. En utilisant les valeurs de la contrainte limite en cisaillement nécessaire au délestage du morceau de glace obtenue lors de ces essais ainsi que du temps de nucléation, il a été possible de valider le modèle d'adhésion de la glace sur un substrat pour des températures d'accrétion de la glace de -5 à -13 °C. Les essais ont également montré que la glace accrétée à -13 °C, dans les conditions expérimentales de la chambre climatique, donne la même valeur de contrainte en cisaillement pour la partie adhésive et cohésive. Pour les températures en dessous de -13 °C, la partie adhésive devient trop grande comparativement à celle cohésive et les ruptures deviennent alors seulement cohésives. Les résultats obtenus pour les 54 essais avec le SRB ont permis de comparer les prévisions du modèle sur un phénomène comportant plus de complexité et de variabilité que les essais en chambre climatique. Or, malgré cette très grande variabilité des résultats obtenue en soufflerie réfrigérée, le modèle d'adhésion permet d'obtenir une bonne prédiction de la contrainte limite en cisaillement pour les pales d'aluminium, d'aluminium gravé chimiquement et celle recouverte de Wearlon® pour des températures allant de -5 à -25 °C.

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. Jean Perron, ainsi que ma codirectrice, Mme Marie-Isabelle Farinas pour leurs conseils et pour le soutien tant moral que financier qu'ils m'ont offert. Je les remercie également pour l'occasion qu'ils m'ont donnée d'effectuer cette merveilleuse et intéressante étude sur un sujet si riche et fondamental qu'est l'adhésion de la glace. Je tiens également à remercier M. Roger Aubert ainsi que M. James Corrigan de Bell Helicopter Textron pour leurs conseils et expertises en matière de givrage sur les hélicoptères. Merci à Mme Caroline Laforte pour toutes ses connaissances, son soutien moral, ses conseils, ses idées, ses nombreux articles ainsi que sa bonne humeur. Merci également à M. Jean-Louis Laforte pour ses nombreuses connaissances au sujet de la glace. Merci aussi à tous les employés du LIMA pour leur aide, en particulier à Caroline Blackburn pour les nombreux essais expérimentaux et à Elizabeth Crook pour les nombreuses corrections. Merci à Jean-Denis Brassard, Derek Harvey et Éric Villeneuve pour leur bonne compagnie et les bonnes discussions.

Je souhaite finalement remercier ma conjointe, Éveline Audet, pour sa patience, ses sacrifices et son soutien moral, merci de m'avoir accompagné tout au long de ces longues années études.



## TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ.....	ii
REMERCIEMENTS .....	iv
TABLE DES MATIERES .....	v
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES SYMBOLES .....	xv
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>2</b>
1.1 Mise en situation .....	2
1.2 Objectifs .....	7
1.2.1 Objectif principal.....	7
1.2.2 Objectifs secondaires.....	7
1.3 Revue de littérature .....	8
1.3.1 Adhésion de la glace.....	8
1.3.2 Types de bris.....	8
1.3.3 Mécanisme d'adhérence.....	12
1.3.4 Couche semi-liquide .....	13
1.3.5 Temps de nucléation.....	16

1.4	Méthodologie .....	18
1.4.1	<i>CAT en chambre climatique</i> .....	19
1.4.2	<i>SRB en soufflerie réfrigérée</i> .....	20
2	MODÈLE MATHÉMATIQUE.....	24
2.1	Modèle mathématique d'adhésion de la glace .....	24
2.1.1	<i>Hypothèse #1 : Couche semi-liquide</i> .....	25
2.1.2	<i>Hypothèse #2 : Bris adhésifs</i> .....	26
2.1.3	<i>Développement du modèle</i> .....	26
2.2	Analyse des contraintes lors d'un essai avec le CAT .....	35
2.3	Analyse des contraintes lors d'un essai avec le SRB.....	38
3	RÉSULTATS .....	48
3.1	Conditions d'essais expérimentales .....	48
3.2	Résultats des essais en chambre climatique (CAT) .....	50
3.2.1	<i>Température d'accrétion versus température d'essai</i> .....	50
3.2.2	<i>Contrainte de cisaillement critique en fonction de la température</i> .....	54
3.3	Résultats des essais en soufflerie réfrigérée (SRB).....	64
3.4	Ajustement de la couche semi-liquide .....	69
4	DISCUSSION.....	72
4.1	Temps de nucléation des essai avec le CAT .....	72

4.2	Essais en soufflerie réfrigérée .....	75
4.2.1	<i>Aluminium en soufflerie réfrigérée</i> .....	76
4.2.2	<i>Aluminium gravé en soufflerie réfrigérée</i> .....	83
4.2.3	<i>Wearlon® en soufflerie réfrigérée</i> .....	86
4.3	Épaisseur de la couche semi-liquide .....	88
5	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	91
5.1	Conclusions .....	91
5.2	Recommandations .....	93
6	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	96
	ANNEXE A .....	99
A.1	Mesures de surface .....	99
A.1.1	<i>Aluminium 6061-T6 (CAT)</i> .....	99
A.1.2	<i>Aluminium Gravé (CAT)</i> .....	100
A.1.3	<i>Wearlon® (CAT)</i> .....	100
A.1.4	<i>Aluminium 6063-T6 (SRB)</i> .....	101
A.1.5	<i>Aluminium Gravé (SRB)</i> .....	101
A.1.6	<i>Wearlon® (SRB)</i> .....	102
	ANNEXE B.....	103
B.1	Description de la chambre climatique pour les essais avec le CAT .....	103

B.2	Description du Centrifuge Adhesion Test (CAT) .....	106
B.3	Description d'un essai avec le CAT en chambre climatique .....	107
B.4	Mesures expérimentales brutes (CAT) .....	109
<i>B.4.1</i>	<i>Première série d'essais</i> .....	<i>109</i>
<i>B.4.2</i>	<i>Deuxième série d'essais</i> .....	<i>115</i>
ANNEXE C	.....	122
C.1	Description de la soufflerie pour les essais avec le SRB .....	122
C.2	Description du Spinning Rotor Blade (SRB) .....	126
<i>C.2.1</i>	<i>Le moteur électrique du SRB</i> .....	<i>126</i>
<i>C.2.2</i>	<i>Le rotor</i> .....	<i>127</i>
<i>C.2.3</i>	<i>Les pales</i> .....	<i>128</i>
<i>C.2.4</i>	<i>Dimensions des pales</i> .....	<i>130</i>
<i>C.2.5</i>	<i>Programme d'exploitation informatique</i> .....	<i>133</i>
C.3	Description d'un essai avec le SRB en soufflerie réfrigérée .....	134
C.4	Paramètres mesurés lors d'un essai .....	136
<i>C.4.1</i>	<i>Photographie</i> .....	<i>136</i>
<i>C.4.2</i>	<i>Masse de glace</i> .....	<i>137</i>
<i>C.4.3</i>	<i>Hauteur</i> .....	<i>137</i>
<i>C.4.4</i>	<i>Longueur de délestage</i> .....	<i>137</i>

C.5	Mesures expérimentales brutes (SRB).....	138
C.5.1	<i>Essais de délestage</i> .....	138
C.5.2	<i>Hauteur d'accrétion de glace sur les essais de délestage</i> .....	142

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Pylône électrique effondré sous le poids du verglas [3].....	3
Figure 2 : Aile d'avion recouverte de givre [4] .....	4
Figure 3 : Système de dégivrage pneumatique sur les bords d'attaques des ailes d'avions ...	4
Figure 4 : Application du fluide dégivrant sur un avion de ligne avant le décollage .....	5
Figure 5 : Application d'un produit antigivre avant le décollage sur le fuselage et les ailes d'un avion de ligne .....	5
Figure 6 : Énergie de fracture en fonction de la température [5].....	9
Figure 7 : Force d'adhésion en fonction de la température [6].....	10
Figure 8 : Représentation de la couche semi-liquide [11] .....	14
Figure 9 : Épaisseur de la couche semi-liquide en fonction de la température pour diverses mesures expérimentales [11] .....	15
Figure 10 : Phases de cristallisation de l'eau surfondue [13] .....	16
Figure 11 : Représentation schématique de la couche semi-liquide à la surface d'un cristal de glace [11].....	25
Figure 12 : Représentation de la couche d'eau entre deux surfaces planes parallèles.....	26
Figure 13 : Représentation schématique de la couche semi-liquide à l'interface de la glace et du substrat .....	30
Figure 14 : Régression linéaire de la tension superficielle de l'eau surfondue .....	32
Figure 15 : Épaisseur de la couche semi-liquide en fonction de la température provenant de l'équation empirique posée par Döppenschmidt et al.....	33

Figure 16 : Représentation des forces importantes lors d'un essai de CAT .....	36
Figure 17 : Représentation de la couche semi-liquide à l'interface de la glace et du substrat sur une poutre de CAT .....	37
Figure 18 : Représentation du SRB .....	39
Figure 19 : Représentation de l'accrétion de glace sur une pale en rotation .....	39
Figure 20 : Photo d'un essai d'accrétion de glace sur une pale en rotation dans une soufflerie réfrigérée.....	40
Figure 21 : Définition de la distance de rupture et de la position du centre de masse.....	40
Figure 22 : Forces importantes dans la direction radiale sur le bloc de glace .....	41
Figure 23 : Visualisation des contraintes sur un bloc .....	42
Figure 24 : Approximation de l'aire de cohésion .....	44
Figure 25 : Représentation des deux séries d'essais avec le CAT ( <i>T<sub>g</sub> : Température de givrage et T<sub>e</sub> : Température de l'essai</i> ) .....	49
Figure 26 : Paramètres expérimentaux des essais avec le SRB ( <i>Température de l'essai, vitesse de rotation et diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau en surfusion</i> ) .....	50
Figure 27 : Contrainte de cisaillement critique de la glace accrétée à -8 °C pour différente température d'essais avec le CAT .....	51
Figure 28 : Contrainte de cisaillement critique de la glace pour les essais utilisant le CAT avec les mêmes températures d'accrétion et de délestage .....	55
Figure 29 : Poutre d'aluminium après délestage à -10 °C .....	57
Figure 30 : Poutre d'aluminium gravé après délestage à -10 °C .....	57

Figure 31 : Poutre de Wearlon® après délestage à -10 °C .....	58
Figure 32 : Poutre d'aluminium après délestage à -13 °C .....	59
Figure 33 : Poutre d'aluminium gravé après délestage à -13 °C .....	59
Figure 34 : Poutre de Wearlon® après délestage à -13 °C .....	60
Figure 35 : Poutre d'aluminium après délestage à -15 °C .....	61
Figure 36 : Poutre d'aluminium gravé après délestage à -15 °C .....	61
Figure 37 : Poutre de Wearlon® après délestage à -15 °C .....	62
Figure 38 : Poutre de Wearlon® après délestage à -20 °C .....	63
Figure 39 : Contrainte en cisaillement critique moyenne de la glace atmosphérique accrétée sur l'aluminium pour les essais en soufflerie réfrigérée utilisant le SRB.....	65
Figure 40 : Contrainte en cisaillement critique moyenne de la glace atmosphérique accrétée sur l'aluminium gravé chimiquement pour les essais en soufflerie réfrigérée utilisant le SRB.....	66
Figure 41 : Contrainte en cisaillement critique moyenne de la glace atmosphérique accrétée sur le Wearlon® pour les essais en soufflerie réfrigérée utilisant le SRB.....	67
Figure 42 : Regroupement des contraintes moyennes critiques en cisaillement mesurées avec le SRB en soufflerie réfrigérée pour tous les substrats.....	69
Figure 43 : Épaisseur ajustée de la couche semi-liquide en fonction de la température pour les trois types de substrat .....	70
Figure 44 : Représentation d'une gouttelette d'eau à la surface de l'aluminium pour les essais en soufflerie réfrigérée .....	85
Figure 45 : Dimensions des poutres d'essai pour le CAT .....	103



Figure 46 : Gicleur hydraulique utilisé pour la précipitation givrante en chambre climatique de 4 mètres .....	104
Figure 47 : Poutres d'essais sur le support avant le début des précipitations givrantes en chambre climatique.....	104
Figure 48 : Accrétion de glace sur des poutres d'aluminium pour les essais de CAT .....	105
Figure 49 : Diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau dans la chambre climatique.....	105
Figure 50 : Montage CAT.....	106
Figure 51 : Représentation schématique de la soufflerie réfrigérée .....	122
Figure 52 : Rampe des gicleurs pneumatiques à balayage vertical de la soufflerie réfrigérée .....	123
Figure 53 : Diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau dans la soufflerie réfrigérée.....	124
Figure 54 : Débitmètres contrôlant les gicleurs de la soufflerie réfrigérée.....	124
Figure 55 : Section d'essais de la soufflerie réfrigérée.....	125
Figure 56 : Rotor du SRB .....	127
Figure 57 : Pale d'aluminium 6063-T6.....	128
Figure 58 : Pale d'aluminium recouverte de Wearlon®.....	128
Figure 59 : Pale d'aluminium gravé chimiquement.....	129
Figure 60 : Interface du programme de contrôle de la soufflerie réfrigérée et du SRB .....	133

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Angle d'accrétion en fonction du type de substrat, de la température d'accrétion, de la dimension des gouttelettes et du RPM de l'essai .....	45
Tableau 2 : Paramètres expérimentaux (gris) et ajustés (blanc) pour le calcul théorique de l'adhésion pour les essais avec le CAT .....	56
Tableau 3: Paramètres expérimentaux (gris) et ajustés (blanc) pour le calcul théorique de l'adhésion pour les essais avec le SRB.....	68

## LISTE DES SYMBOLES

$A_1$	Aire de la rupture en tension	$m^2$
$A_2$	Aire de la rupture en cisaillement	$m^2$
$A_{conv}$	Aire de transfert convectif	$m^2$
$A_c$	Aire de contact à l'interface	$m^2$
$A_{xi}$	Aire de la glace à la position Xi	$m^2$
$C_p$	Capacité calorifique de l'air	J/kgK
$CAT$	Centrifuge adhesion test	-
$d$	Dimension caractéristique	m
$e$	Épaisseur de la glace	m
$F_{ad}$	Force d'adhésion capillaire	N
$F_{centrif}$	Force centrifuge	N
$F_m$	Force de maintien	N
$F_\sigma$	Force de rupture en tension	N
$F_\tau$	Force de rupture en cisaillement	N
$g$	Accélération gravitationnelle	$m/s^2$
$h_c$	Coefficient de convection	W/m <sup>2</sup> K
$H$	Épaisseur de la couche semi-liquide	m
$h$	Hauteur de la glace	m

$L$	Longueur de glace détachée	m
$m_g$	Masse du morceau de glace détaché	kg
$MVD$	Median volumetric diameter	m
$N$	Force normale	N
$Nu$	Nombre de Nusselt	-
$P$	Poids	N
$\dot{Q}_{conv}$	Flux thermique convectif	W
$R$	Longueur de la pale	m
$r$	Position radiale du centre du bloc de glace	m
$\hat{r}$	Vecteur unitaire radial	-
$R_a$	Rugosité moyenne de surface	m
$r_{cm}$	Position radiale du centre de masse	m
$RPM$	Rotation par minute	$2\pi rad / s$
$r_r$	Position radiale de la rupture	m
$r_s$	Rayon de la sphère	m
$R_{sm}$	Distance moyenne entre les aspérités de surface (Substrat)	m
$SRB$	Spinning rotor blade	-
$T_\infty$	Température de l'air	°C
$T$	Température	°C
$t$	Temps d'accrétion	s

$t_n$	Temps de nucléation d'une goutte d'eau surfondue	s
$U$	Vitesse d'impact des gouttelettes	m/s
$U_e$	Vitesse d'écoulement de l'air	m/s
$V_{CAT}$	Volume d'une gouttelette du CAT	m <sup>3</sup>
$V_g$	Volume de glace détaché	m <sup>3</sup>
$V_{SRB}$	Volume d'une gouttelette du SRB	m <sup>3</sup>
$x_f$	Position finale du détachement	m
$x_i$	Position initiale du détachement	m
$x_r$	Distance de rupture	m
$\alpha$	Coefficient de proportionnalité tension/cisaillement	-
$\gamma$	Tension de surface de l'eau surfondue	N/m
$\theta$	Angle d'accrétion de la glace	rad
$\theta_c$	Angle de contact de l'eau sur une surface	rad
$\theta_g$	Angle de contact couche semi-liquide/glace	rad
$\theta_s$	Angle de contact couche semi-liquide/substrat	rad
$\lambda$	Conductivité thermique de l'air	W/mK
$\nu$	Viscosité cinématique	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Masse volumique de l'air	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_g$	Masse volumique de la glace	kg/m <sup>3</sup>

$\bar{\rho}_g$	Masse volumique moyenne de la glace	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\max}$	Masse volumique maximale de la glace	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Contrainte en tension	N/m <sup>2</sup>
$\tau$	Contrainte en cisaillement	N/m <sup>2</sup>
$\tau_e$	Contrainte de cisaillement expérimentale CAT	N/m <sup>2</sup>
$\omega$	Vitesse angulaire	rad/s

# **CHAPITRE 1**

## **INTRODUCTION**

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 MISE EN SITUATION

Lorsque l'on commence à s'intéresser à l'état solide de l'eau, on remarque assez rapidement qu'il existe une panoplie de structures différentes ainsi qu'un riche vocabulaire pour décrire ces différents états. Les Inuits d'Arctique oriental canadien ont un peu moins de 95 mots pour décrire les états de la neige et de la glace [1]. Que ce soit la neige nouvellement tombée ou la glace qui se forme sur les bords de mer, ce peuple inuit montre par leur langage que la phase solide de l'eau n'est pas simple et comporte plusieurs structures complexes variant selon les conditions de formation.

Outre la complexité de la glace, il existe un impact réel relié à l'accrétion de celle-ci sur les installations, véhicules et constructions faites par l'homme. La présence de glace sur ceux-ci pose énormément de problèmes et met en jeu la sécurité des gens. Son éradication a également des coûts énergétiques élevés.

Un exemple important des problèmes causés par la glace est celui, en 1998, de la crise du verglas au Québec où des milliers de foyers se sont retrouvés sans chauffage ni électricité durant plus d'un mois [2]. Comme le montre la Figure 1, les pylônes servant au maintien des fils transportant l'électricité ont accumulé jusqu'à 100 mm de verglas causant l'effondrement de la structure sous le poids de la glace et privant ainsi une partie du Québec d'électricité.





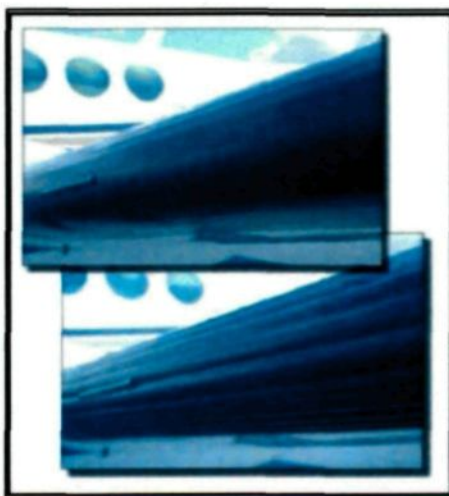
**Figure 1 : Pylône électrique effondré sous le poids du verglas [3]**

Dans le domaine de l'aviation, le givre est également un facteur problématique dans le bon fonctionnement des avions et des hélicoptères tant au niveau du sol qu'en vol (Figure 2). En effet, une accumulation de glace sur un aéronef en vol qui traverse un nuage ayant une forte concentration de gouttelettes d'eau surfondues cause une diminution de portance et une augmentation de la traînée qui occasionnent alors un risque à la sécurité des pilotes et des passagers. Elle peut également mettre hors service les instruments de mesure permettant une bonne connaissance des conditions météorologiques extérieures et ainsi diminuer la visibilité et le contrôle des aéronefs par les pilotes.



**Figure 2 : Aile d'avion recouverte de givre [4]**

Des solutions telles que les systèmes de dégivrage pneumatique (Figure 3), le dégivrage par fluide dégivrant (Figure 4) et/ou la protection par fluide antigivre (Figure 5) permettent d'améliorer la résistance des aéronefs à ces conditions climatiques difficiles.



**Figure 3 : Système de dégivrage pneumatique sur les bords d'attaques des ailes d'avions**



Figure 4 : Application du fluide dégivrant sur un avion de ligne avant le décollage



Figure 5 : Application d'un produit antigivre avant le décollage sur le fuselage et les ailes d'un avion de ligne

Ce sont des problèmes de ce type qui motivent les scientifiques à essayer de comprendre les processus physiques en cause dans l'adhésion de la glace afin d'en minimiser les risques dans le futur. Il est donc important de comprendre les processus physico-chimiques par lesquels la glace adhère à un substrat afin d'améliorer la qualité de la protection antigivre et d'ainsi augmenter la sécurité des gens lors des conditions météorologiques affectant l'utilisation normale de ces appareils et installations.

Le premier chapitre de ce mémoire présente une mise en situation de la problématique menant à ce projet. Les objectifs y sont présentés ainsi que la revue de littérature portant sur l'état actuel des connaissances sur le sujet. Ce chapitre se termine par la présentation de la méthodologie.

Le deuxième chapitre portera sur l'élaboration du modèle mathématique d'adhésion de la glace atmosphérique sur un substrat permettant de prédire la contrainte de cisaillement nécessaire à l'arrachement d'un morceau de glace accréte en fonction des conditions expérimentales d'accrétion. Cette partie présentera également la théorie reliée aux calculs de cisaillement avec les montages expérimentaux utilisés, soient, le CAT et le SRB.

Le troisième chapitre présentera quant à lui les résultats expérimentaux ainsi que les résultats générés par le modèle mathématique.

Le quatrième chapitre de ce mémoire portera sur l'analyse des résultats expérimentaux ainsi que sur la comparaison du modèle mathématique d'adhésion de la glace atmosphérique à ces résultats. Cette partie permettra de vérifier la validité du modèle et d'ainsi faire ressortir les paramètres physiques importants liés à l'adhésion de la glace à un substrat.

Le chapitre 5 portera sur une rétrospective des conclusions obtenues par l'analyse des résultats ainsi que les recommandations pour la continuation du projet et les améliorations pouvant être apportés au modèle mathématique.

Le sixième et dernier chapitre présente la liste de références bibliographiques utilisées pour ce mémoire.

## **1.2 OBJECTIFS**

### **1.2.1 Objectif principal**

L'objectif principal de ce projet de maîtrise consiste à construire un modèle mathématique à partir des divers processus physico-chimiques en jeu dans l'adhésion de la glace atmosphérique à différents substrats de manière à en prévoir la contrainte limite en cisaillement nécessaire au bris d'adhérence.

### **1.2.2 Objectifs secondaires**

L'objectif secondaire consiste à valider les résultats expérimentaux obtenus en chambre climatique avec le *Centrifuge Adhesion Test* (CAT) et de comparer les prévisions du modèle avec les résultats expérimentaux obtenus en soufflerie réfrigérée avec le *Spinning Rotor Blade* (SRB) afin de vérifier si le modèle est applicable à un phénomène d'accrétion plus complexe.

### 1.3 REVUE DE LITTÉRATURE

#### 1.3.1 Adhésion de la glace

La revue de littérature suivante permet de vérifier la compréhension actuelle des phénomènes physiques liés à l'adhésion de la glace atmosphérique sur un substrat et plus précisément de ce qui se nomme la couche d'eau semi-liquide présente à la surface de la glace.

Lorsque l'on commence à s'intéresser à l'adhérence de la glace sur les divers matériaux, on se rend rapidement compte que le sujet est d'une grande complexité. Plusieurs paramètres influencent l'adhésion de la glace où les principaux sont la nature du substrat, le type de glace et les conditions de givrage. Ces divers paramètres semblent jouer un rôle important dans la force d'adhérence de celle-ci.

#### 1.3.2 Types de bris

Les tests d'adhésion effectués par Andrews et al. [5] sur l'aluminium, le titane et l'acier inoxydable montrent que la plupart des ruptures semblent cohésives et que lorsque l'on se rapproche de la température de fusion, les bris deviennent adhésifs et l'énergie de fracture diminue de beaucoup. La Figure 6 montre l'énergie de fracture adhésive ( $\theta$ ) ou cohésive ( $2\tau$ ), selon le cas, en fonction de la température. Le type de glace utilisé pour ces essais est toutefois différent de la glace atmosphérique, car les échantillons ne proviennent pas de glace accrétée par cristallisation de gouttelettes d'eau surfondue, mais par congélation d'eau à diverses températures.

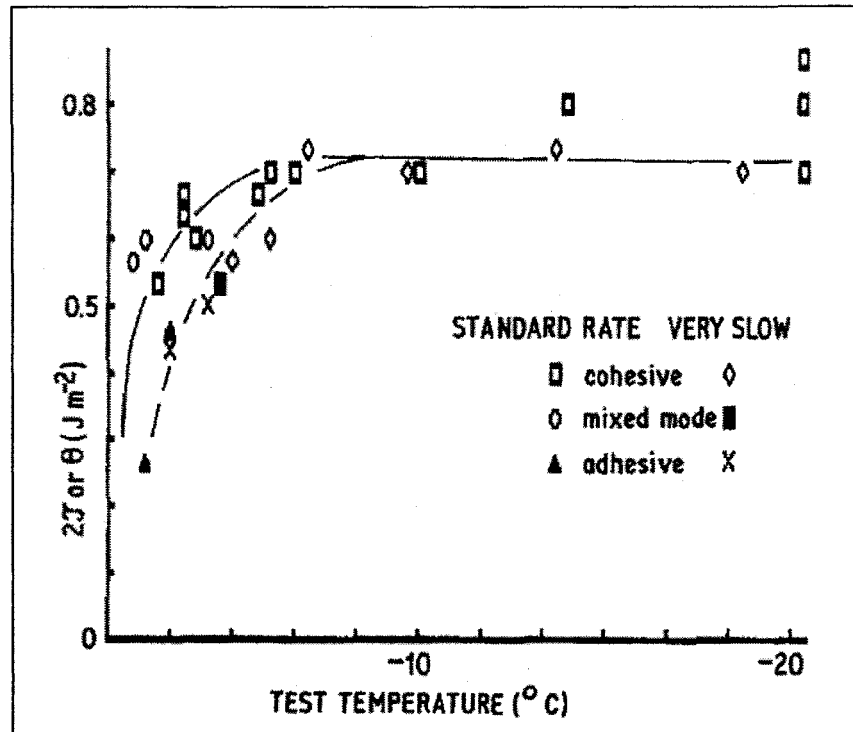


Figure 6 : Énergie de fracture en fonction de la température [5]

Le graphique présenté à la Figure 6 montre que l'énergie nécessaire à la rupture atteint une limite donnée par la force de cohésion de la glace. On peut donc en conclure que la force de cohésion est plus grande que celle d'adhésion pour le type de glace utilisé par Andrews et al..

Les mesures expérimentales effectuées par Jellinek [6] montrent que la force d'adhésion augmente linéairement lorsque l'on diminue la température telle que le montre la Figure 7. Leurs observations montrent également qu'à partir de  $-13^{\circ}C$ , les bris deviennent presque totalement cohésifs pour le type de glace utilisé, soit, une glace provenant de la congélation de l'eau. La Figure 7 ne montre pas de transition entre les bris

adhésifs et les bris cohésifs, car les bris cohésifs viennent à remplacer les bris adhésifs de manière linéaire.

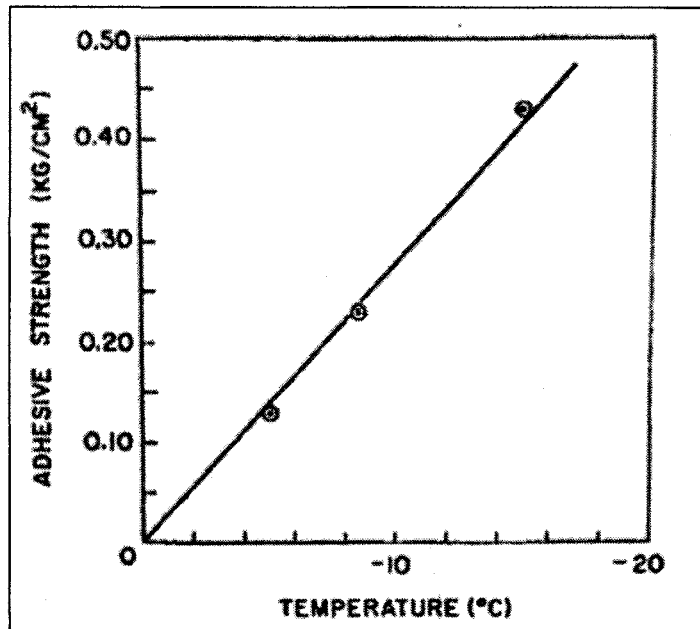


Figure 7 : Force d'adhésion en fonction de la température [6]

On peut s'attendre à un régime transitoire autour de  $-13^{\circ}\text{C}$  où les ruptures sont de nature mixte (i.e. un mélange de bris adhésifs et cohésifs) lorsque le type de glace se rapproche du type de glace produit par Jellinek.

Les mêmes mesures expérimentales montrent que la force adhésive en tension est de l'ordre de 15 fois supérieure à la force d'adhérence en cisaillement. Bien qu'ils ne donnent aucune information sur l'axe de croissance à laquelle les essais sont effectués, on peut tout de même comprendre cette variation du fait que la structure cristalline de la glace comporte deux axes différents.



Jellinek montre également que l'énergie nécessaire au décollement par cisaillement de deux plaques de verre maintenues à l'interface par un mince film d'eau est sensiblement la même que celle nécessaire au décollement par cisaillement de deux morceaux de glace sans ajout de film d'eau [7]. Cette expérience suggère alors la présence d'un film d'eau à la surface de la glace. Jellinek indique aussi que la présence de cette couche semi-liquide est non seulement présente à l'interface glace-air, mais également à l'interface glace-substrat (métal, polymère, quartz, etc.) [7].

Les forces d'adhésion entre la glace et le substrat semblent donc directement liées à cette fine couche d'eau et une étude dans cette direction donnera certainement des informations importantes sur quelles forces sont les plus importantes (cohésive vs adhésive) en fonction de la présence plus ou moins grande de cette couche.

Une expérience effectuée par Hori [8] montre qu'un film d'eau de  $1,3 \mu\text{m}$  présent entre deux plaques de verre atteint un point de congélation de  $-96^\circ\text{C}$ . On peut donc considérer que la couche semi-liquide peut exister en dessous du point de congélation de l'eau et que celle-ci se trouve alors dans un état de surfusion.

À la suite de ces lectures, l'idée que la couche semi-liquide soit à l'origine de l'adhérence de la glace à un substrat semble alors très réaliste et la réalisation d'un modèle mathématique basé sur cette hypothèse devient alors importante afin de vérifier si une telle supposition permet d'obtenir les bonnes valeurs d'adhésion de la glace.

Le modèle mathématique élaboré dans ce mémoire portera sur la partie adhésive des bris entre la glace et le substrat et ne sera donc valide que pour les essais ou seulement ce type de bris surviendra.

### 1.3.3 Mécanisme d'adhérence

Selon Petrenko et al. [9], les mécanismes responsables de l'adhérence glace/substrat proviennent des interactions entre les molécules. Ces interactions se décomposent en trois catégories qui sont :

- Force électrostatique
- Liaison covalente
- Force de Van der Waals

La première catégorie d'interaction dépend des charges électriques présentes sur les deux surfaces et la force de la liaison est donnée par la loi de Coulomb.

La seconde catégorie porte sur les liaisons covalentes qui sont des liaisons chimiques dans lesquelles les atomes mettent en commun au moins un électron provenant d'une de ses couches externes afin de former un doublet d'électrons. Ce type d'interaction dépend en grande partie de la nature chimique du substrat.

La liaison covalente n'est pas considérée comme un mécanisme dominant de l'adhérence de la glace puisque la glace adhère aussi aux surfaces n'ayant aucune affinité avec les molécules d'eau.

La troisième et dernière catégorie porte sur les forces de Van der Waals qui se séparent en trois sous-catégories qui sont la force de Keesom (effet d'orientation), la force de Debye (effet d'induction) et la force de London (effet de dispersion).

Bien que faisant partie de la même famille que les forces de Van der Waals, on peut ajouter les liaisons hydrogène comme une interaction à part entière, car l'intensité est dix fois supérieure à celle de Van der Waals.

Un autre phénomène vient s'ajouter aux outils servant à la compréhension de l'adhérence de la glace et porte sur la structure de la glace en surface. Ce phénomène se nomme couche semi-liquide de surface. Le terme de surface tel que considéré ici représente aussi bien la surface de la glace à l'interface glace/air que la surface à l'interface glace/substrat. En effet, lorsque la surface considérée se trouve à l'interface glace/substrat, certaines liaisons chimiques peuvent se produire entre la glace et le substrat. Malgré ces interactions chimiques, une couche amorphe est également présente de par la différence de structure entre les cristaux de glace et la structure du substrat.

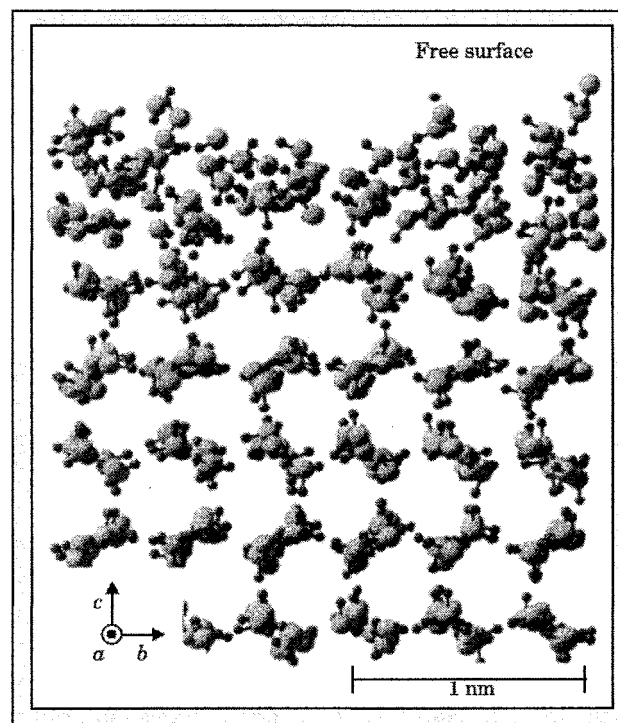
Bien que plusieurs auteurs tels que Petrenko expliquent l'adhérence de la glace par les forces physico-chimiques existant à l'interface de la glace et du substrat, la présence de la couche amorphe permet de considérer le problème d'un point de vue plus macroscopique que l'utilisation de ces forces dans le calcul de l'adhérence.

Une étude de cette couche semi-liquide doit donc être approfondie afin de vérifier si sa présence peut expliquer l'adhésion de la glace en faisant abstraction des interactions moléculaires à l'interface.

#### **1.3.4 Couche semi-liquide**

C'est en 1859 que Michael Faraday, physicien et chimiste britannique à qui l'on doit la découverte de l'induction magnétique, postula qu'un mince film d'eau recouvrait la surface de la glace [10]. L'explication de ce film d'eau provient du fait que les molécules

d'eau se retrouvent sans pairs à la surface de la glace (Figure 8) et forment une couche amorphe qui a pour effet de minimiser l'énergie de surface [11]. C'est cette couche de molécules amorphe qui est appelée couche semi-liquide. Plusieurs expériences ont par la suite été faites afin de vérifier ce postulat.



**Figure 8 : Représentation de la couche semi-liquide [11]**

Si l'on étudie les expérimentations effectuées par Hosler et al.[12], on remarque que pour un environnement saturé en vapeur d'eau, la couche d'eau à la surface de la glace est présente jusqu'à  $-25^{\circ}\text{C}$  alors que pour des environnements secs, elle est absente en dessous de  $-3^{\circ}\text{C}$ . De ce constat, il semble donc que la pression de vapeur saturante liée à l'humidité relative a son importance dans l'épaisseur de la couche semi-liquide.

Rosenberg et al. ont regroupé diverses mesures expérimentales concernant l'épaisseur de la couche semi-liquide (Figure 9). Bien qu'aucune des mesures expérimentales de l'épaisseur de cette couche semi-liquide ne soit identique sur la Figure 9, ces différences peuvent s'expliquer par la variation des paramètres expérimentaux d'un groupe à l'autre. En effet, si la glace utilisée par un groupe provient d'un morceau de glace atmosphérique accrétée dans telles conditions il est normal que l'épaisseur de cette couche semi-liquide soit différente que pour une glace provenant de la congélation de l'eau, car les deux types de structure cristalline ne sont pas les mêmes.

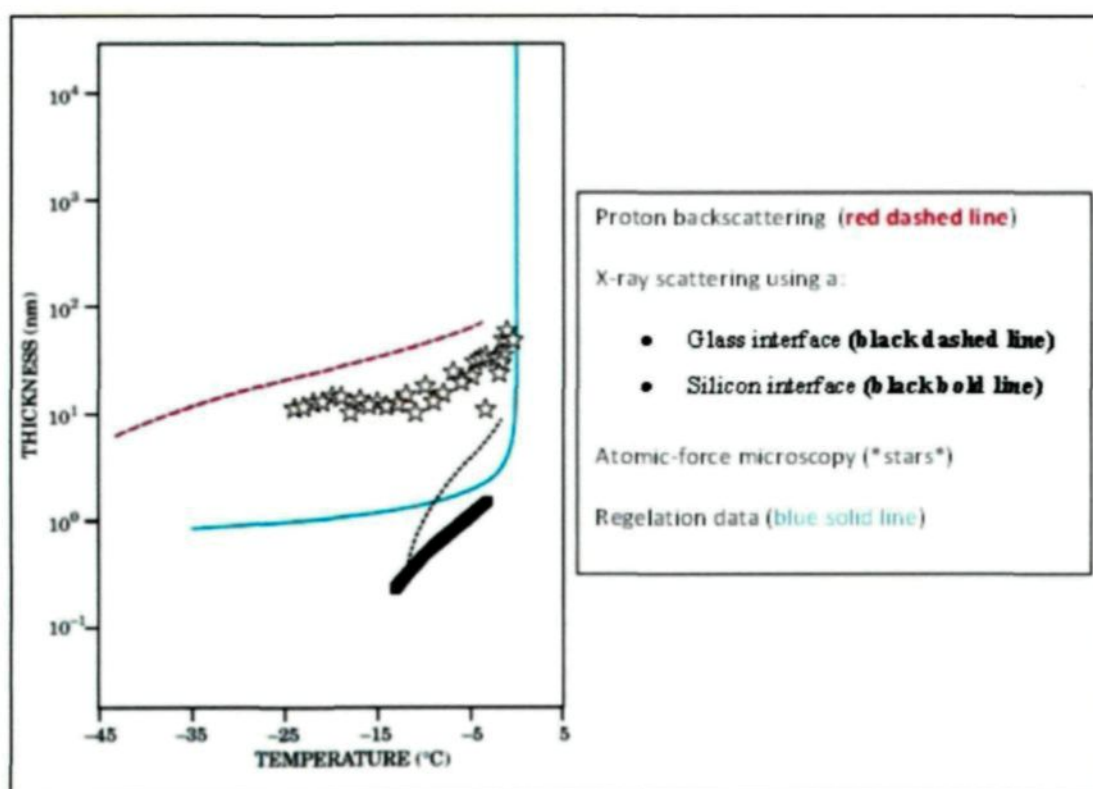


Figure 9 : Épaisseur de la couche semi-liquide en fonction de la température pour diverses mesures expérimentales

### 1.3.5 Temps de nucléation

Lorsque l'on analyse les processus entourant la cristallisation de gouttelettes surfondues, on remarque que ce processus peut être divisé en cinq phases distinctes. La Figure 10 [13] présente une courbe de température typique de la cristallisation d'un fluide surfondu.

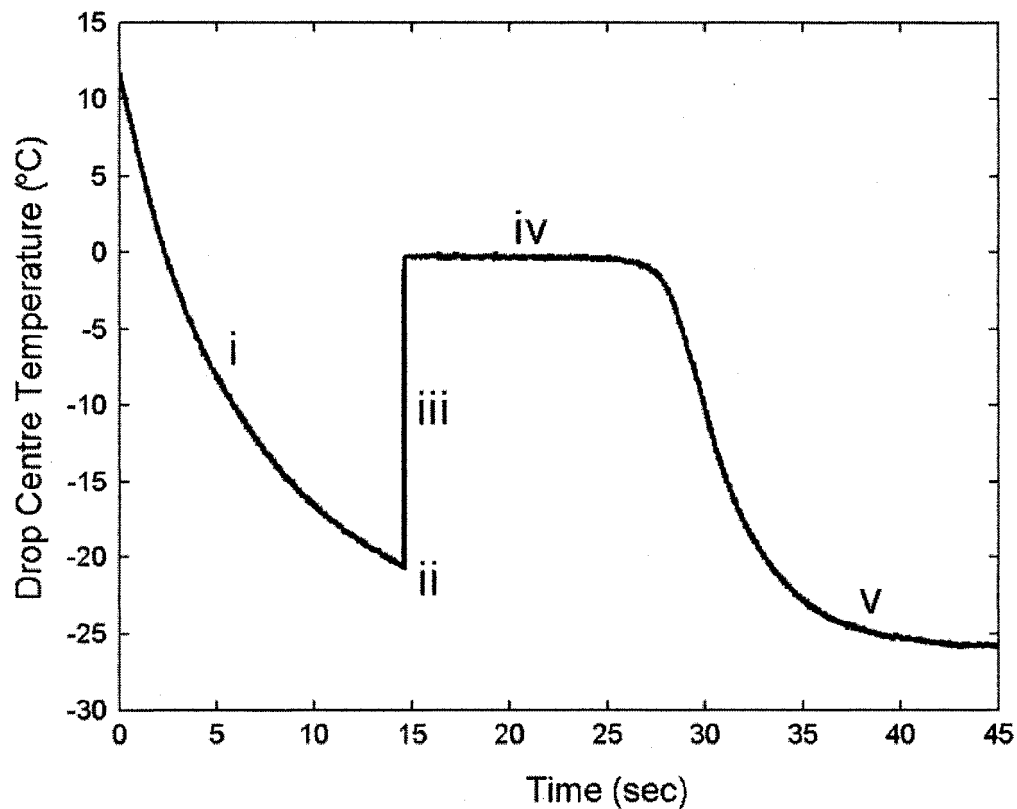


Figure 10 : Phases de cristallisation de l'eau surfondue [13]

Les phases de cristallisation sont :

- i. Surfusion
- ii. Début de la nucléation
- iii. Recalcsence
- iv. Solidification
- v. Refroidissement du cristal à la température de l'essai

Lors des essais expérimentaux effectués dans le cadre de ce mémoire, l'eau distillée utilisée pour les précipitations givrantes est préalablement maintenue à une température de 4 °C et l'on suppose que la température de l'essai est atteinte par les gouttelettes lors de leur arrivée sur le substrat. On considère alors que le début de la troisième phase commence lors de l'impact des gouttelettes sur le substrat. Le temps de nucléation ne tient donc pas compte de la phase un et deux mais seulement de la durée de la phase trois. Cette durée de la phase trois est appelée ici le temps de nucléation.

Selon Macklin [14] ainsi que Bauerecker [15], la phase trois détermine la structure finale de la glace en figeant une matrice de cristallisation qui viendra se consolider lors de la solidification en phase quatre. L'utilisation de ce temps dans le modèle d'adhésion semble alors légitime étant donné que c'est lors de cette nucléation que l'épaisseur de la couche semi-liquide est déterminée et que l'adhésion de la glace sur le substrat commence.

Plusieurs auteurs ont mesuré le temps de nucléation de gouttelettes d'eau surfondues millimétriques et leurs résultats permettent d'obtenir l'ordre de grandeur de la durée de ce processus.

Les résultats expérimentaux de Jung et al. [16] obtenus par l'observation à l'aide d'une caméra haute-vitesse montrent que le temps de solidification d'une gouttelette d'eau surfondue de 2 mm de diamètre apposée sur un substrat super hydrophobe est de 18 ms à -15 °C avec convection forcée sous un vent de 9 m/s.

Bauerecker et al. [15] ont quant à eux observés à l'aide d'une caméra haute-vitesse et d'une caméra infrarouge un temps de 20 ms pour une gouttelette de 3 mm de diamètre en lévitation acoustique à une température de -25 °C.

Yang et al. [17] montrent qu'une gouttelette de 2,6 mm de diamètre à une température de surfusion de  $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  arrivant à 2,3 m/s sur surface d'acier inoxydable à  $-30,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  sous un vent de 4,6 m/s à  $-40,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  est de 2,5 ms.

On remarque ici que le temps de nucléation semble varier en fonction des paramètres expérimentaux tels que le diamètre des gouttelettes, leur température de fusion, la température de l'air, la vitesse d'impact ainsi que le type de substrat.

Les conditions expérimentales de Yang sont celles qui se rapprochent le plus des conditions expérimentales des essais effectués avec le CAT. En considérant que la différence dans la dimension des gouttelettes se traduit par une variation de la chaleur latente à libérer, on peut alors grossièrement comparer le temps de nucléation obtenu par Yang à ceux du CAT.

Les résultats expérimentaux de Macklin [18] montrent plus spécifiquement que le temps de nucléation de gouttelettes d'eau surfondue de  $108\text{ }\mu\text{m}$  de diamètre arrivant sur une plaque de métal à 26 m/s pour une température de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  est de  $50\text{ }\mu\text{s}$ .

#### **1.4 MÉTHODOLOGIE**

Suite à une revue de la littérature sur les propriétés de la glace et de son interaction avec un substrat, il a été possible de déterminer que l'hypothèse d'une couche semi-liquide à l'interface de la glace et du substrat serait une approche intéressante à utiliser. Basé sur cette hypothèse, un modèle a été développé afin de prendre en compte cette couche semi-liquide dans l'adhésion de la glace sur un substrat. Le modèle ainsi réalisé fait ressortir les paramètres physiques importants à prendre en compte dans la contrainte



critique en cisaillement nécessaire au bris d'adhérence de la glace accrétée sur un substrat.

Ces paramètres sont :

- Le diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau surfondues
- Les paramètres de surfaces des substrats
- La température d'accrétion
- La vitesse d'impact des gouttelettes
- La tension de surface de la couche semi-liquide
- L'épaisseur de la couche semi-liquide en fonction de la température
- Le temps de nucléation d'une gouttelette surfondue
- L'angle de contact

Les essais expérimentaux permettront de valider cette approche et de comparer le modèle.

Afin d'obtenir des valeurs d'adhérence en cisaillement et en tension nécessaire au bris d'adhérence de la glace accrétée sur un substrat, deux montages expérimentaux développés au LIMA sont utilisés, soient, le CAT en chambre climatique et le SRB en soufflerie réfrigérée.

#### **1.4.1 CAT en chambre climatique**

Le montage CAT permet d'obtenir la valeur de la contrainte critique en cisaillement à partir de la vitesse de rotation où il y a décollement d'un échantillon de glace accrété au bout d'une poutre d'un substrat donné.

Les essais faits avec le CAT sont effectués sur des poutres de différent substrat, soit, de l'aluminium 6061-T4, le même aluminium soumis à une gravure chimique par HCl le rendant ainsi hydrophile ainsi qu'un revêtement hydrophobe, soit, le Wearlon®.

Afin d'étudier les effets de deux températures, soient, celle lors de l'accrétion et celle lors de l'essai de délestage, deux séries d'essais sont effectuées. La première série consiste à effectuer l'accrétion de la glace à la température constante de  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  et de procéder aux essais d'adhérence à cinq différentes températures, soient,  $-5$ ,  $-8$ ,  $-10$ ,  $-15$  et  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pour la deuxième série d'essais, les deux températures, celle d'accrétion et celle de l'essai d'adhésion, sont les mêmes. Ces mesures sont effectuées à six différentes températures, soient,  $-5$ ,  $-10$ ,  $-13$ ,  $-15$ ,  $-20$  et  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La dimension des gouttelettes d'eau surfondues est maintenue constante durant l'accrétion de glace pour les deux séries d'essais à un diamètre volumétrique médian (MVD) de  $303 \pm 34\text{ }\mu\text{m}$ .

La description de la chambre climatique, du montage CAT et de la procédure expérimentale est présentée en détail à l'ANNEXE B.

#### **1.4.2 SRB en soufflerie réfrigérée**

Le deuxième montage, soit, le SRB utilisé en soufflerie réfrigérée, est un modèle réduit de pale d'hélicoptère en rotation ce qui permet de se rapprocher des conditions réelles de givrage atmosphérique des pales d'un hélicoptère et a été développé au LIMA par Gouez et Fortin [19, 20].

Pour ce montage, le délestage du morceau de glace nécessite l'action d'une contrainte en cisaillement à l'interface glace/substrat ainsi qu'une contrainte en tension à l'intérieur de la glace perpendiculaire à l'axe de rotation.

Plusieurs essais de givrage sont effectués avec le SRB afin de comparer les prévisions du modèle avec un phénomène d'accrétion plus complexe que les essais d'accrétion statique effectués avec le CAT.

Les essais avec le SRB sont effectués en utilisant une teneur en eau liquide de  $0,7 \pm 0,1 \text{ g/m}^3$ , une vitesse de vent de 15 m/s et sous cinq différentes températures, soient, -5, -10, -15, -20 et -25 °C.

La dimension des gouttelettes d'eau surfondue présente dans le nuage atmosphérique recrée en soufflerie réfrigérée pour les essais avec le SRB ont un MVD de  $27 \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$ .

La vitesse de rotation des pales est de 3200 RPM. Afin d'étudier l'effet sur la valeur d'adhésion d'une variation de la vitesse d'impact des gouttelettes, un essai est effectué à une vitesse de 1600 RPM à une température de -15 °C en utilisant les mêmes paramètres expérimentaux que les autres essais. Les substrats utilisés pour tous les essais en soufflerie sont des pales d'aluminium 6063-T4, des pales du même aluminium ayant été gravé chimiquement avec du HCl pour le rendre hydrophile ainsi que des pales recouvertes de Wearlon®, un revêtement hydrophobe.

Les séries d'essais effectués avec ces deux montages expérimentaux permettent de comparer le modèle aux résultats expérimentaux et de faire ressortir la variation de la contrainte limite en cisaillement de la glace atmosphérique en fonction de la température d'accrétion, de la température des tests d'adhérence, de la vitesse d'impact des gouttelettes d'eau surfondues, de la taille des gouttelettes et des propriétés de surface du substrat.

Pour chacun des substrats, soient, les trois utilisés pour les mesures avec le CAT et les trois utilisés pour les mesures avec le SRB, des mesures de rugosité de surface sont effectuées afin d'utiliser ces données dans le modèle.

La description de la soufflerie réfrigérée, du montage SRB et de la procédure expérimentale est présentée en détail dans l'ANNEXE C.

## **CHAPITRE 2**

### **MODÈLE MATHÉMATIQUE**

## **2 MODÈLE MATHÉMATIQUE**

### **2.1 MODÈLE MATHÉMATIQUE D'ADHÉSION DE LA GLACE**

Tout d'abord, il est important d'indiquer que ce projet de maîtrise utilise le montage du SRB réalisé par Gaëtan Gouez [19] et l'équipe du LIMA lors de sa maîtrise effectuée au département des sciences appliquées de l'Université du Québec À Chicoutimi (UQAC) en 2010.

Il est également important de mentionner qu'un premier modèle mathématique d'adhérence de la glace atmosphérique a été développé par Guy Fortin [21] utilisant la force électrostatique entre la glace et le substrat pour expliquer l'adhérence. Compte tenu du fait qu'une nouvelle hypothèse sur la nature de l'adhésion a été posée, ce mémoire propose un nouveau modèle d'adhérence ayant pour but de vérifier si la présence de la couche semi-liquide à l'interface de la glace et du substrat permet d'obtenir la valeur d'adhérence de la glace. Le modèle présenté ici ne s'appuie donc sur aucun autre modèle existant.

Afin de modéliser l'adhésion de la glace sur un substrat, il est tout d'abord crucial de se questionner sur les propriétés de surface de la glace tant à la surface libre qu'à l'interface. En effectuant une revue littéraire sur le sujet, on remarque qu'un concept revient souvent et concerne la présence d'une fine couche semi-liquide à la surface de la glace, et ce, pour toute interface, que ce soit entre la glace et l'air ou un substrat.

### 2.1.1 Hypothèse #1 : Couche semi-liquide

Comme le montre la Figure 11, la présence de ce mince film d'eau semi-liquide provient du fait qu'en surface, les molécules d'eau formant le cristal de glace ne parviennent plus à former de liaison avec d'autres molécules d'eau et s'en retrouvent alors dans un état amorphe afin de minimiser leur énergie. C'est donc cet état amorphe que l'on nomme la couche semi-liquide qui sera la base de ce modèle.

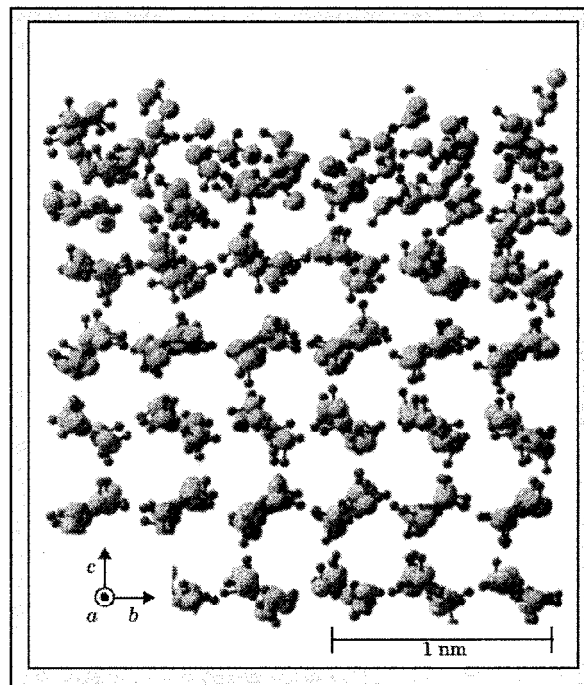


Figure 11 : Représentation schématique de la couche semi-liquide à la surface d'un cristal de glace [11]

Le point de départ du modèle sera alors de prendre comme hypothèse principale la présence d'un film d'eau semi-liquide à l'interface entre la glace et le substrat dont l'épaisseur varie en fonction de la température. Toute autre interaction physico-chimique ayant lieu à l'interface outre cette couche semi-liquide sera négligée.

### 2.1.2 Hypothèse #2 : Bris adhésifs

La cohésion du substrat est prise comme étant plus élevée que l'adhésion de la glace et les détachements provenant d'un bris cohésif d'une partie du substrat ou à l'intérieur de la glace sera négligée dans ce modèle. Le modèle sera donc utilisé seulement pour les cas avec bris adhésifs.

### 2.1.3 Développement du modèle

#### 2.1.3.1 Force et cisaillement à l'interface

Lorsque l'on joint deux matériaux avec un mince film d'eau (Figure 12), il se crée une force d'attraction perpendiculaire à la surface des matériaux qui les maintient alors collée. Cette force se nomme force d'adhésion capillaire.

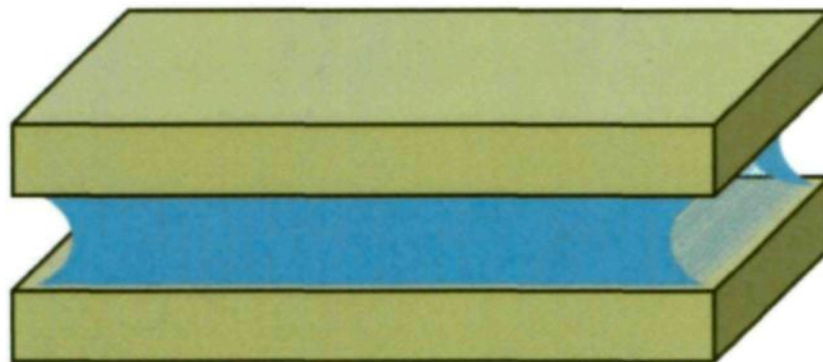


Figure 12 : Représentation de la couche d'eau entre deux surfaces planes parallèles

La force d'adhésion capillaire ( $F_{ad}$ ) liant deux surfaces planes parallèles est donnée par l'équation 1 et dépend de la surface de contact ( $A_c$ ), de la tension de surface de l'eau



( $\gamma$ ), de l'épaisseur du film d'eau ( $H$ ) et de l'angle de contact entre la couche semi-liquide et la glace ( $\theta_g$ ) et le substrat ( $\theta_s$ ).

$$F_{ad} = \frac{A_c 2\gamma (\cos(\theta_g) + \cos(\theta_s))}{H} \quad (1)$$

La valeur de résistance en tension ( $\sigma$ ) est donnée par l'équation 2 suivante

$$\sigma = \frac{F_{ad}}{A_c} = \frac{2\gamma (\cos(\theta_g) + \cos(\theta_s))}{H} \quad (2)$$

La force d'adhésion capillaire est quant à elle appliquée perpendiculairement à la surface des substrats et représente donc ici une force en tension. Or, dans le cas qui nous intéresse, on cherche à déterminer la contrainte en cisaillement permettant la rupture à l'interface de la glace et du substrat.

L'équation suivante montre la relation entre la tension et le cisaillement [22] avec le coefficient de proportionnalité  $\alpha$  tel que

$$\tau = \alpha \sigma \quad (3)$$

On obtient alors la résistance au cisaillement de l'interface glace/substrat donnée par l'équation suivante

$$\tau = \alpha \frac{2\gamma (\cos(\theta_g) + \cos(\theta_s))}{H} \quad (4)$$

### 2.1.3.2 Coefficient paramétrique $\alpha$

Le coefficient alpha est quant à lui posé comme étant donné par les paramètres de surface et d'expérimentation. Les principaux facteurs qui changent d'un substrat à l'autre et entre les essais utilisant le CAT et le SRB sont la distance moyenne entre les aspérités de surface ( $R_{sm}$ ), la rugosité moyenne ( $R_a$ ) et le diamètre volumétrique moyen des gouttelettes ( $MVD$ ). D'autres paramètres varient également d'une expérimentation à l'autre et sont la vitesse d'impact des gouttelettes sur le substrat ( $U$ ) et le temps de nucléation d'une gouttelette de volume donnée ( $t_n$ ). La vitesse de nucléation varie en fonction du coefficient de convection thermique, coefficient qui dépend de la vitesse d'écoulement de l'air de l'essai, de la température de celle-ci ainsi que de la conductivité thermique du substrat. Le temps de nucléation dépend également du volume des gouttelettes, du transfert thermique par conduction, par rayonnement et par évaporation.

On obtient alors un coefficient alpha tel que

$$\alpha = \frac{R_{sm} R_a}{MVD \cdot U t_n} \quad (5)$$

### 2.1.3.3 Équation du cisaillement critique

On arrive finalement à l'équation 6 permettant le calcul théorique de la contrainte de cisaillement de la glace atmosphérique accrétée sur un substrat

$$\tau = \frac{2R_{sm} R_a \gamma \left( \cos(\theta_g) + \cos(\theta_s) \right)}{MVD \cdot U t_n H} \quad (6)$$

Où

$R_{sm}$  : Distance moyenne entre les aspérités de surface (m)

$R_a$  : Rugosité moyenne (m)

$\gamma$  : Tension superficielle de la couche semi-liquide (N/m)

$\theta_g$  : Angle de contact de la couche semi-liquide sur le cristal de glace (deg)

$\theta_s$  : Angle de contact de la couche semi-liquide sur le substrat (deg)

$MVD$  : Diamètre volumétrique médian (m)

$U$  : Vitesse d'impact des gouttelettes (m/s)

$t_n$  : Temps de nucléation d'une gouttelette (s)

$H$  : Épaisseur de la couche semi-liquide (m)

Les paramètres  $R_{sm}$ ,  $R_a$ ,  $\theta_s$ ,  $MVD$  et  $U$  sont déterminés à partir de mesures expérimentales effectuées au LIMA. Les paramètres  $\gamma$ ,  $\theta_g$  et  $H$  proviennent quant à eux de la littérature et le paramètre  $t_n$  est un paramètre qui est ajusté avec les résultats expérimentaux.

Afin de calculer une valeur théorique pour la valeur de l'adhésion en cisaillement de la glace sur un substrat avec cette équation, on doit avoir les valeurs de chacun des paramètres.

Les mesures de rugosité de surface sont effectuées à l'aide du Surtronic 25 de la compagnie Taylor Hobson® et les valeurs utilisées sont la moyenne des mesures de surface

prises sur trois axes différents du substrat. Les mesures expérimentales sont présentées à l'ANNEXE A.

### 2.1.3.3.1 Angle de contact

La Figure 13 montre schématiquement la couche semi-liquide présente à l'interface entre la glace et le substrat ainsi que l'angle de contact entre la couche semi-liquide, la glace et le substrat. On suppose ici que la couche semi-liquide se comporte comme l'eau et l'on utilise donc les valeurs d'angle de contact obtenu avec l'eau étant donnée l'impossibilité de mesurer ces angles de contact dans le cadre de ce mémoire.

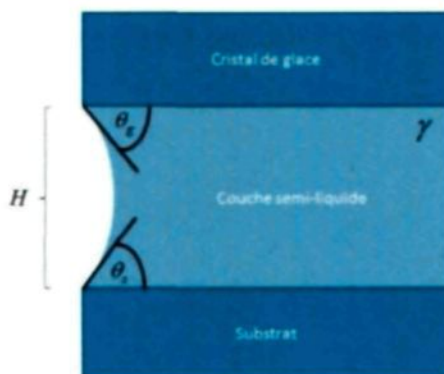


Figure 13 : Représentation schématique de la couche semi-liquide à l'interface de la glace et du substrat

Selon Makkonen [23], l'angle de contact ( $\theta_c$ ) de l'eau à une température de 0 °C déposée sur un morceau de glace maintenue à une température de -25 °C dans une chambre avec une humidité relative de 40 % est de 80°. Cette valeur sera prise comme étant constante en fonction de la température pour les températures en dessous de 0° étant donnée le manque de mesures expérimentales sur ces valeurs.

L'angle de contact pour une goutte d'eau à 20 °C apposée sur l'aluminium est de 80°, l'aluminium gravé 70° et le Wearlon® 106°. Ces valeurs sont également prises comme étant invariables en fonction de la température. L'angle de contact étant calculé à l'aide de l'équation de Young-Dupré, il appert qu'une variation de la chimie de surface du substrat se reflète directement par une modification de la tension de surface solide-liquide et solide vapeur. Cette variation de tension de surface vient modifier l'équilibre des forces de tension entre la vapeur, le liquide et le solide se traduisant par une modification de l'angle de contact. L'équation 6 permettant de calculer théoriquement la contrainte critique en cisaillement est donc sensible à la chimie de surface.

Lorsque l'on dépose une gouttelette d'eau entre deux plaques parallèles, l'observation montre que l'angle de contact  $\theta_c$  entre l'eau et l'un des substrats peut être pris comme l'approximation présentée par l'équation suivante

$$\theta_s \approx \frac{1}{2} \theta_c \quad (7)$$

Avec  $\theta_s$  l'angle de contact entre l'eau et l'un des substrats tel que présenté à la Figure 13 et  $\theta_c$ , l'angle de contact pour l'eau sur la surface du substrat seul. La même équation est utilisée pour l'angle de contact entre l'eau et le cristal de glace ( $\theta_g$ ).

#### 2.1.3.3.2 Tension de surface

Pour obtenir la valeur de tension de surface de la couche semi-liquide, on suppose que celle-ci a les mêmes propriétés que l'eau en surfusion. Tel que mesuré par Hacker [24], la valeur de tension de surface de l'eau en surfusion est pratiquement linéaire en fonction

de la température et peut donc être trouvée approximativement par une régression linéaire des mesures expérimentales de la tension de surface de l'eau entre 0 et 100 °C. La Figure 14 montre la droite de régression linéaire utilisée pour l'obtention de la tension de surface de l'eau en dessous de zéro degré Celsius.

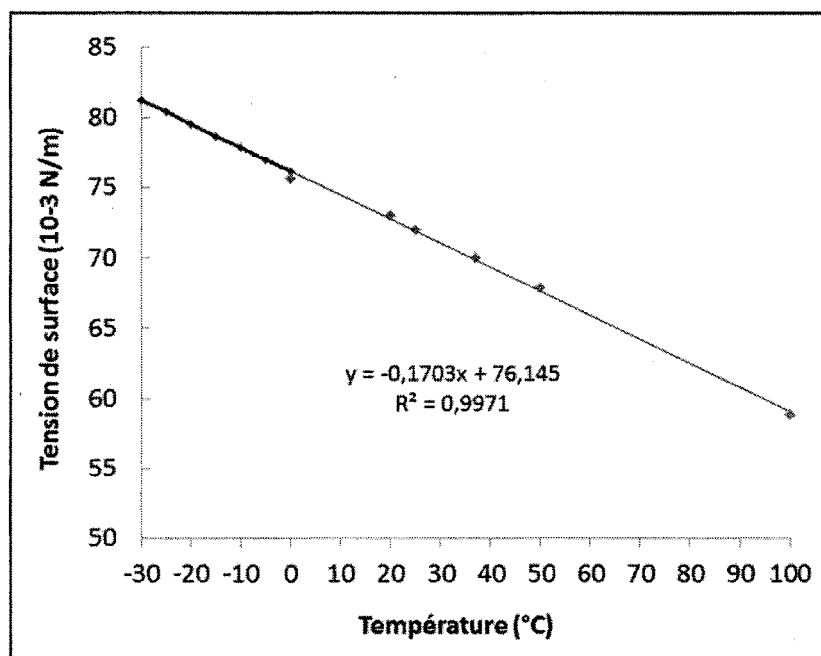


Figure 14 : Régression linéaire de la tension superficielle de l'eau surfondue

#### 2.1.3.3.3 Épaisseur de la couche semi-liquide

Plusieurs mesures ont été faites [11, 25-27] afin de mesurer l'épaisseur de la couche semi-liquide. La Figure 9 présentée dans la section 1.3.4 montre les résultats regroupés de la mesure de l'épaisseur de cette couche en fonction de la température pour divers types de mesures expérimentales.

Les résultats qui seront utilisés ici pour l'épaisseur de la couche semi-liquide sont ceux effectués par microscopie par force atomique provenant de Döppenschmidt et al. [25]. Cette approche sera utilisée étant donné que ce groupe de recherche ont posé une équation empirique permettant de reproduire les résultats expérimentaux de l'épaisseur de la couche semi-liquide et que la valeur d'humidité relative lors de l'essai s'apparente à celle mesurée en laboratoire lors des essais.

La Figure 15 montre cette fonction qui sera utilisée pour calculer l'épaisseur de la couche semi-liquide où les paramètres  $a$  et  $b$  présentés dans cette figure sont ceux posés par Döppenschmidt et al. pour leur équation empirique.

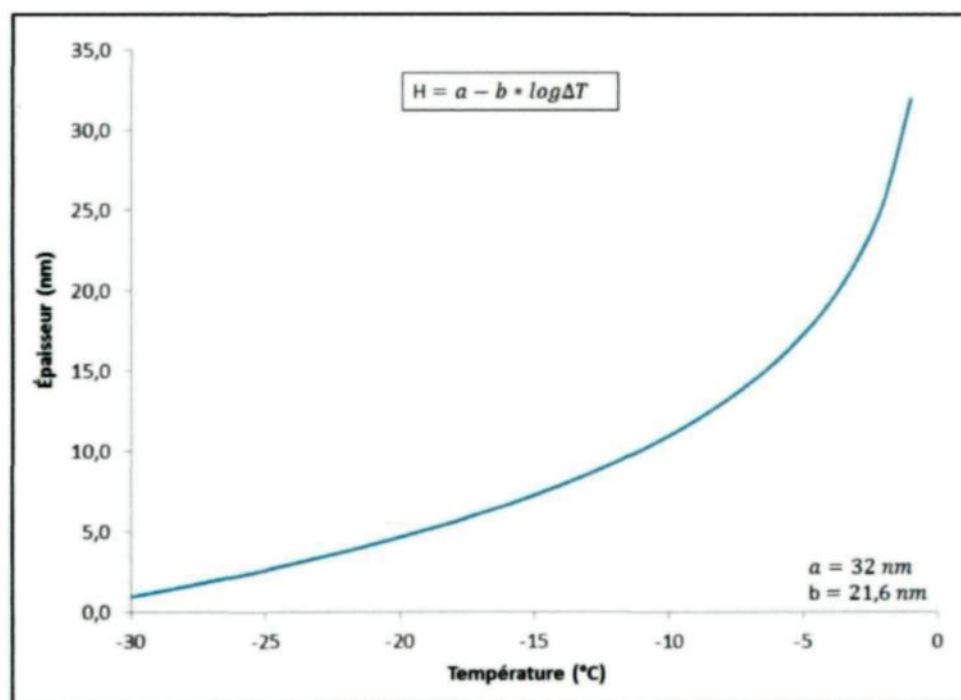


Figure 15 : Épaisseur de la couche semi-liquide en fonction de la température provenant de l'équation empirique posée par Döppenschmidt et al.

L'épaisseur de la couche semi-liquide dépend par contre de plusieurs facteurs expérimentaux et de la nature du substrat. Le paramètre  $b$  sera légèrement ajusté aux résultats expérimentaux afin de reproduire le plus fidèlement possible le comportement du modèle vis-à-vis des résultats. Cet ajustement permet de modifier l'épaisseur de la couche semi-liquide en fonction de la conductivité thermique du substrat.

#### 2.1.3.3.4 Vitesse d'impact des gouttelettes d'eau surfondues

La vitesse d'impact des gouttelettes sur le substrat est prise comme étant 1,65 m/s lors de l'accrétion de la glace dans la chambre climatique. Cette estimation provient de la distance et du temps de chute d'une gouttelette à partir du gicleur jusqu'au substrat mesuré expérimentalement.

Pour les essais en soufflerie réfrigérée, il est nécessaire d'utiliser une vitesse d'impact moyenne étant donné que la vitesse d'impact dépend de la position radiale sur la pale en rotation. On néglige également la vitesse du vent de 15 m/s étant donné que la rotation donne une moyenne nulle vis-à-vis l'impact de ce vent et que la vitesse de rotation est beaucoup plus grande.

L'équation 8 donne le calcul de la vitesse moyenne sur une longueur donnée d'une pale en rotation.

$$\langle U \rangle = \frac{1}{L} \int_{r_r}^R \omega r dr = \frac{\omega}{2L} [R^2 - r_r^2] \quad (8)$$

La vitesse d'impact utilisée sera calculée en fonction de la longueur de délestage moyenne  $L$  pour chacun des substrats et chacune des températures d'essais.



### 2.1.3.3.5 Temps de nucléation

Le paramètre restant à évaluer est le temps de nucléation. Étant donné que la mesure de ce paramètre est en dehors de la portée de ce mémoire, les valeurs qui seront utilisées pour le temps de nucléation proviendront de l'ajustement des courbes prévisionnelles sur les résultats expérimentaux pour chacun des substrats. Cet ajustement se fera en optimisant la courbe théorique présentée à l'équation 6 sur les mesures expérimentales obtenues pour l'adhésion avec le CAT et le SRB. Les paramètres utilisés dans le calcul théorique proviennent de mesures expérimentales faites au LIMA et d'autres pris dans la littérature scientifique. Les temps de nucléation ainsi obtenus seront comparés avec les résultats présentés dans la littérature afin de valider ceux-ci. Seul l'ordre de grandeur pourra être comparé étant donné que plusieurs paramètres influencent le temps de nucléation d'une gouttelette.

## 2.2 ANALYSE DES CONTRAINTES LORS D'UN ESSAI AVEC LE CAT

En utilisant le *Centrifuge Adhesion Test* il est possible de déterminer la valeur de la contrainte de la glace sur un substrat et d'ainsi comparer la prévision du modèle aux mesures expérimentales afin de valider celui-ci.

Si l'on prend un morceau de glace positionné sur une barre d'aluminium en rotation [28] et que l'on y applique les forces en jeux à l'interface de la glace et de l'aluminium on obtient le diagramme tel que présenté à la Figure 16. Les forces tangentes à la rotation ne sont pas représentées ici étant donné qu'elles sont très négligeables devant la grandeur des autres forces en jeux [20].

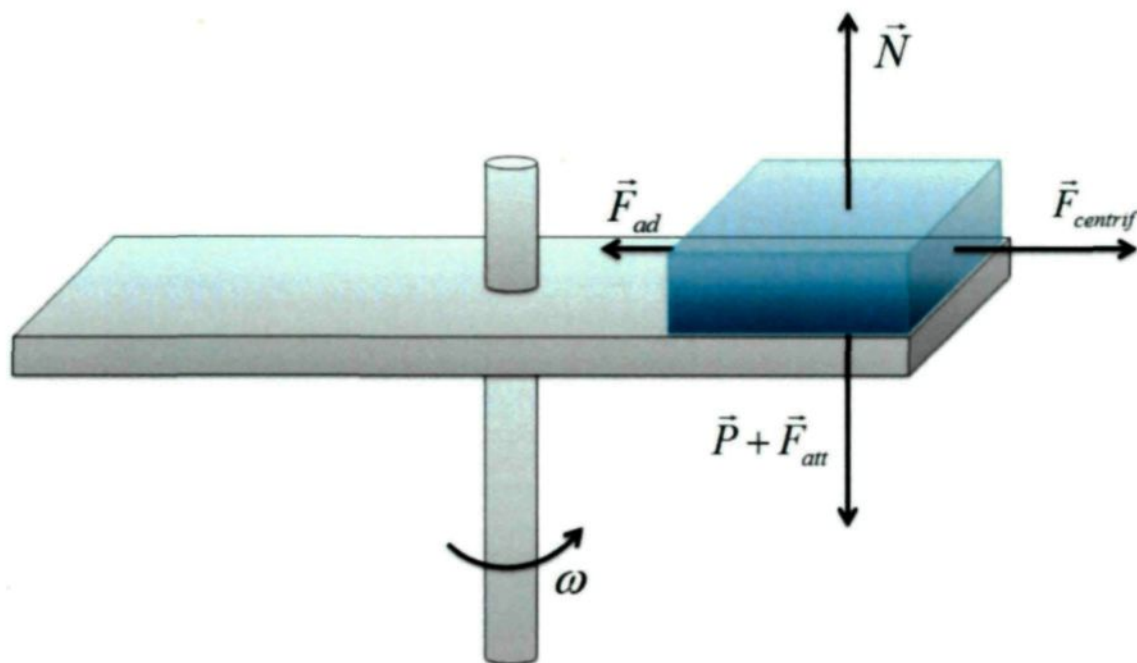


Figure 16 : Représentation des forces importantes lors d'un essai de CAT

Comme on peut le remarquer dans cette figure, les forces en jeux sont la force normale  $\vec{N}$ , la force centrifuge  $\vec{F}_{centrif}$ , la force d'attraction capillaire  $\vec{F}_{att}$ , le poids  $\vec{P}$  du morceau de glace et la force d'adhésion  $\vec{F}_{ad}$ .

La Figure 17 représente quant à elle une vue de côté du système de bloc de glace sur une poutre tournante avec les forces en jeux appliquées au centre de masse du bloc de glace. Elle montre également l'épaisseur  $h$  de la couche semi-liquide à l'interface glace-aluminium. L'épaisseur est ici augmentée afin de montrer la présence de cette couche semi-liquide, car en réalité cette couche d'eau n'est que de quelques nanomètres.

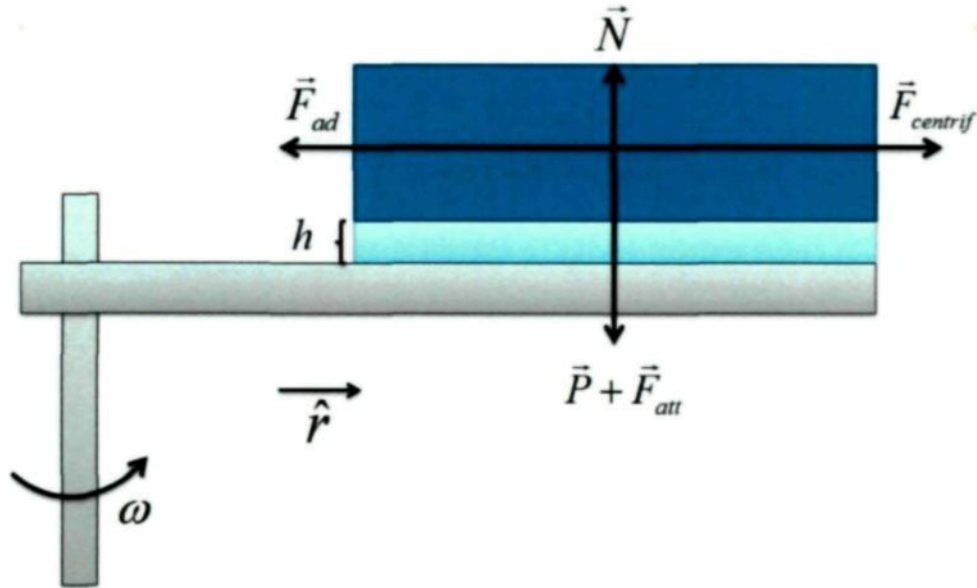


Figure 17 : Représentation de la couche semi-liquide à l'interface de la glace et du substrat sur une poutre de CAT

La force centrifuge est fonction de la position radiale  $r$  du centre du bloc de glace selon le centre de rotation, de la vitesse angulaire de rotation  $\omega$  et de la masse de glace  $m_g$  telle que :

$$\vec{F}_{centrif} = m_g r \omega^2 \hat{r} \quad (9)$$

Connaissant l'aire détachée  $A_c$  du morceau de glace, sa masse  $m_g$ , la vitesse angulaire  $\omega$  et la position du centre de masse  $r$  par rapport au centre de rotation, on peut calculer la contrainte de cisaillement expérimentale  $\tau_c$  qui a été nécessaire au détachement du morceau de glace. Cette contrainte de cisaillement n'est autre que la force centrifuge divisée par l'aire sur laquelle elle s'applique, soit,

$$\tau_e = \frac{m_g r \omega^2}{A_c} \quad (10)$$

Afin de valider le modèle d'adhésion de la glace atmosphérique présenté à la section 2.1.3.3, il reste ensuite à comparer les prévisions du modèle aux résultats obtenus avec les différents essais avec le CAT pour les diverses conditions expérimentales choisies.

La précision de cet appareil est de l'ordre de 13 %. Le CAT est choisi pour la validation du modèle étant donné que les bris sont seulement en cisaillement comparativement aux essais avec le SRB.

## 2.3 ANALYSE DES CONTRAINTES LORS D'UN ESSAI AVEC LE SRB

Afin d'obtenir les contraintes critiques ayant lieu dans la glace lors d'un essai en soufflerie réfrigérée avec le SRB, il est nécessaire de poser plusieurs approximations visant à obtenir ces valeurs, car la variation statistique des résultats avec le SRB est grande.

Le problème de base consiste à l'analyse de l'accrétion de la glace sur une pale d'hélicoptère en rotation dans un milieu givrant. On posera que le système est soumis à un vent provenant de la direction  $x$  et parallèle au plan de rotation. La Figure 18 montre le système de pale en rotation.

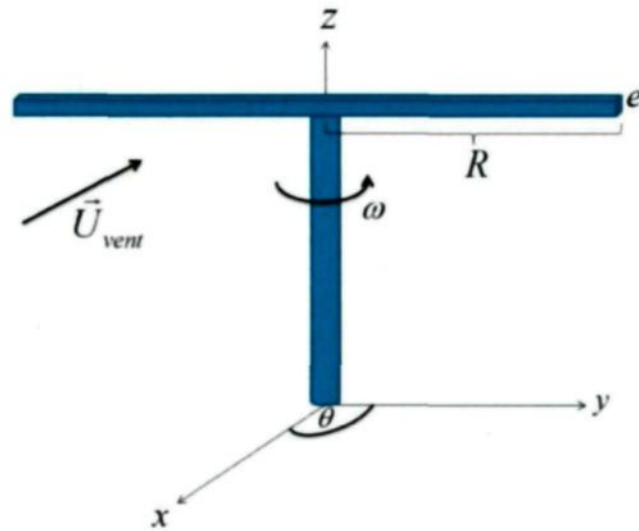


Figure 18 : Représentation du SRB

La Figure 19 montre la pale de longueur  $R$  avec une accréation de glace vue du dessus du système. Bien entendu, la forme de l'accréation est ici une représentation de la réalité, car en fait, la forme de l'accréation n'est pas linéaire.

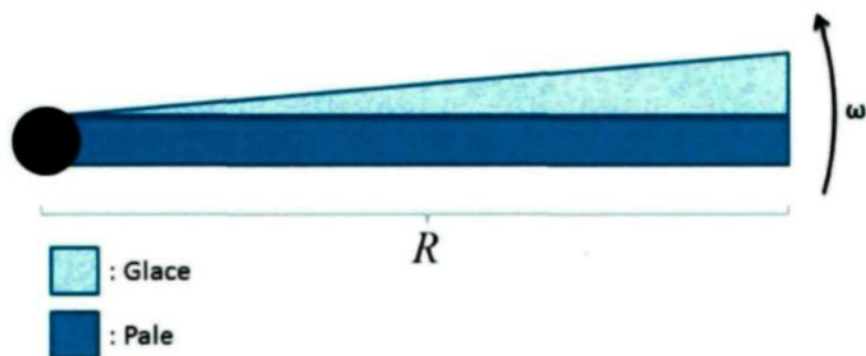


Figure 19 : Représentation de l'accréation de glace sur une pale en rotation

La Figure 20 montre une photo d'une accrétion de glace sur une pale en rotation dans un milieu givrant. On remarque de cette image que la hauteur de glace n'est pas linéaire en fonction de la position radiale.

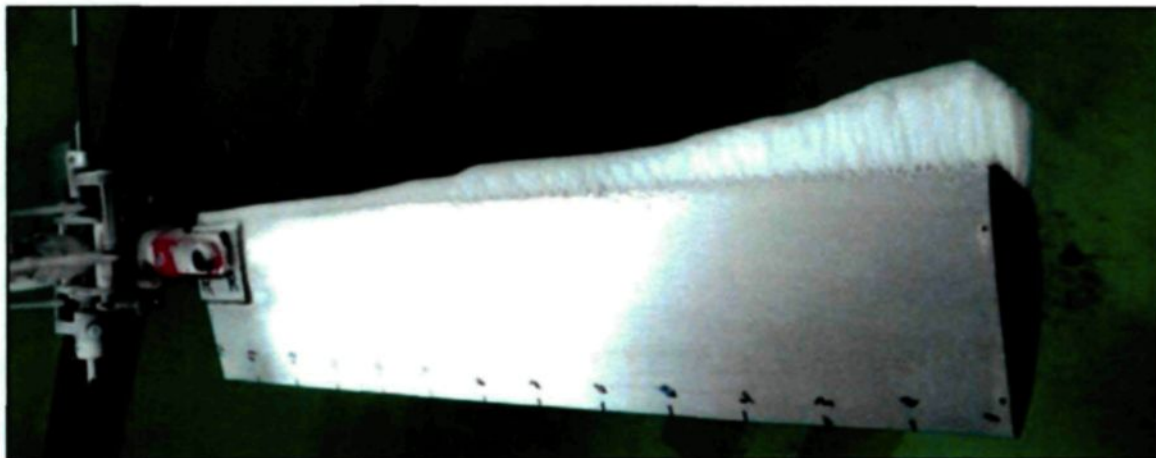


Figure 20 : Photo d'un essai d'accrétion de glace sur une pale en rotation dans une soufflerie réfrigérée

Lors de la rupture d'un morceau de glace, la distance radiale séparant le centre de rotation à cette position de rupture sera appelée distance de rupture  $r_r$ . La Figure 21 illustre la distance de rupture ainsi que la distance du centre de masse du morceau de glace détaché.

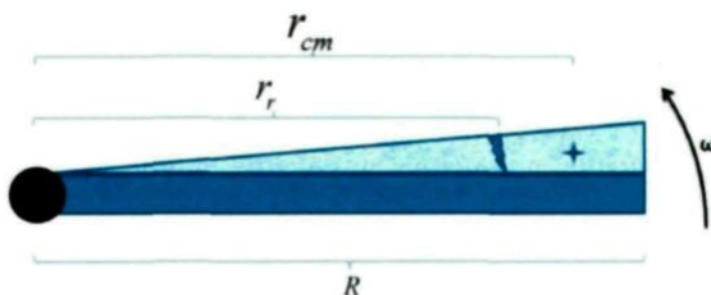


Figure 21 : Définition de la distance de rupture et de la position du centre de masse

Du fait que la hauteur d'accrétion est très petite devant la longueur de la pale et que la forme de l'accrétion n'est pas linéaire, on peut supposer que les forces s'exerçant sur le bloc de glace sont appliquées en son centre de masse. Centre de masse que l'on posera comme étant situé à la moitié de la longueur détachée étant donné la variation de forme du volume de glace accrété. La Figure 22 montre la force centrifuge  $\vec{F}_{centrif}$  et la force de maintien  $\vec{F}_M$  qui s'exercent dans la direction radiale sur le bloc de glace en détachement.

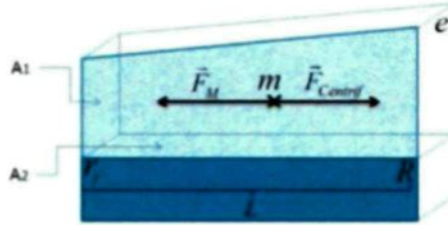


Figure 22 : Forces importantes dans la direction radiale sur le bloc de glace

La force centrifuge est donnée par l'équation suivante

$$\vec{F}_{centrif} = m\omega^2 r_{cm} \hat{r} \quad (11)$$

On nomme ici forces de maintien, l'ensemble des forces d'adhérence de la glace qu'elles soient de cohésion ou d'adhésion. Pour la force de maintien, on a le tenseur des contraintes suivant

$$\vec{\tau} = \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{\theta r} & \sigma_{\theta\theta} & \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} & \tau_{z\theta} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & \tau_{r\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

On remarque ici que seuls les termes radiaux ont été gardés du fait que les autres forces sont négligeables devant celles-ci selon Fortin et al. [20]. La Figure 23 montre les contraintes appliquées sur un cube afin d'en visualiser les actions sur le bloc de glace. On remarque que la contrainte dans la diagonale du tenseur est une contrainte en tension et que celle hors diagonale est une contrainte de cisaillement.

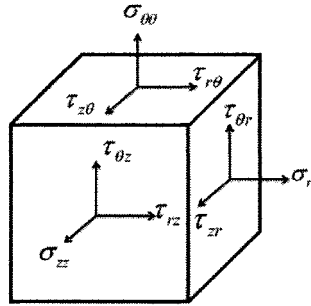


Figure 23 : Visualisation des contraintes sur un bloc

Grâce à ces forces de tension et de cisaillement, on pose la force de maintien du bloc de glace comme étant la somme de ces deux forces. De plus, on pose que la force de tension qui s'applique au centre de masse est calculée non pas avec l'aire de la surface au centre de masse, mais l'aire de surface  $A_1$  (voir Figure 22) au point de rupture.

La force de tension est donnée par

$$\vec{F}_\sigma = -A_1 \sigma \hat{r} \quad (13)$$

Et la force de cisaillement est donnée par

$$\vec{F}_\tau = -A_2 \tau \hat{r} \quad (14)$$



De sorte que l'on obtient la force de maintien suivante

$$\vec{F}_M = -[A_2\tau + A_1\sigma]\hat{r} \quad (15)$$

Du côté expérimental, on pourra, à ce point, connaître la contrainte de cisaillement critique en posant comme approximation que la valeur de la cohésion de la glace est la même pour toutes les conditions expérimentales [20] et prises comme étant égale à

$$\sigma = 0,5 \text{ MPa} \quad (16)$$

On prend également comme approximation pour les températures de -10, -15, -20 et -25 °C, que l'épaisseur de la glace  $e$  est constante et toujours égale à

$$e = 0,005 \text{ m} \quad (17)$$

Pour la température de -5 °C, étant donné que le régime d'accrétion est un régime humide, la forme de l'accrétion n'est pas la même que pour les autres températures et l'épaisseur de l'accrétion est plus grande et est alors posée à 0,01 m.

Pour l'approximation de la forme d'accrétion, la forme géométrique la plus ressemblante à l'accrétion est le trapèze. La Figure 24 montre l'approximation utilisée pour le calcul de l'aire de cohésion  $A_1$ .

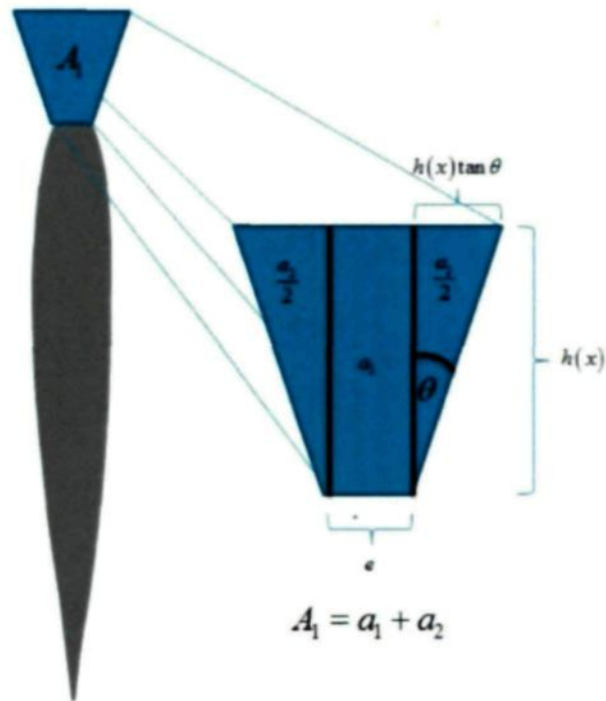


Figure 24 : Approximation de l'aire de cohésion

On peut alors calculer les aires  $A_1$  et  $A_2$  tel que

$$A_1 = a_1 + a_2 = h(e + h \tan \theta) \quad (18)$$

$$A_2 = Le \quad (19)$$

L'angle d'accrétion  $\theta$  varie en fonction de la température de l'essai et les valeurs utilisées proviennent de la mesure expérimentale de ces angles d'accrétion pour chacune des températures et chacun des substrats. L'angle d'accrétion est également posé constant sur la longueur de délestage  $L$  du morceau de glace. Le Tableau 1 montre les valeurs de cet angle qui sont utilisées dans les calculs et qui varient en fonction de la température, du

diamètre volumétrique médian des gouttelettes, de la vitesse de rotation et du type de substrat.

**Tableau 1 : Angle d'accrétion en fonction du type de substrat, de la température d'accrétion, de la dimension des gouttelettes et du RPM de l'essai**

Substrat	Température (°C)	RPM	MVD (μm)	Angle d'accrétion	
				Radian	Degré
Aluminium	-5	3200	27	0,73	42
Aluminium	-10	3200	27	0,68	39
Aluminium	-15	3200	27	0,40	23
Aluminium	-20	3200	27	0,12	7
Aluminium	-25	3200	27	0,07	4
Aluminium	-15	1600	27	0,23	13
Aluminium	-15	3200	38	0,70	40
Aluminium gravé	-5	3200	27	0,5	31
Aluminium gravé	-10	3200	27	-	-
Aluminium gravé	-15	3200	27	0,5	31
Aluminium gravé	-20	3200	27	0,3	18
Aluminium gravé	-25	3200	27	0,3	18
Aluminium gravé	-15	1600	27	0,3	20
Wearlon®	-5	3200	27	0,8	45
Wearlon®	-10	3200	27	0,8	45
Wearlon®	-15	3200	27	0,2	13
Wearlon®	-20	3200	27	0,4	22
Wearlon®	-25	3200	27	0,2	12
Wearlon®	-15	1600	27	0,2	13

Du fait que l'on connaît la vitesse de rotation moyenne du morceau de glace, la masse de glace détachée, la longueur du morceau détachée et la hauteur de l'accrétion à la position de rupture, il est alors possible de calculer la force centrifuge critique au détachement du morceau de glace. On pose donc ensuite que la force centrifuge était de la même grandeur que la force de maintien tel que

$$\|\vec{F}_{centrif}\| = \|\vec{F}_M\| \quad (20)$$

On arrive alors à la valeur de la contrainte de cisaillement critique expérimentale donnée par la formule suivante

$$\tau_c = \frac{m_g \omega^2 r_{cm} - h(e + h \tan \theta) \sigma}{Le} \quad (21)$$

Pour utiliser la formule précédente, il est important de connaître la masse de la glace détachée.

Les essais de rupture avec le SRB donnent deux types de résultats, soient, un morceau de glace se détache d'une seule pale ou un morceau de glace se détache sur chacune des pales.

Lors d'une rupture sur une seule des deux pales, la masse du morceau de glace arraché est donnée par la méthode dite de la masse qui consiste à soustraire le poids de glace accrété sur la pale ayant un morceau arraché à celui de la pale n'ayant pas subi de rupture. Cette approche suppose que l'accrétion de la glace se fait de la même façon sur les deux pales et que la quantité de glace accrétée est donc la même.

Lors d'une rupture sur chacune des pales, l'essai est rejeté du fait que les approximations utilisées pour estimer la masse de glace détachée ne permettent pas d'obtenir les bonnes valeurs. En effet, lorsque comparée avec les essais ayant une seule pale de délestée, la masse de glace approximative n'est pas celle mesurée. Il est donc impossible d'avoir accès à la masse de glace détachée sur chacune des pales et la contrainte de cisaillement critique ne peut être calculée sans ajouter une grande incertitude.

## **CHAPITRE 3**

### **RÉSULTATS**

### 3 RÉSULTATS

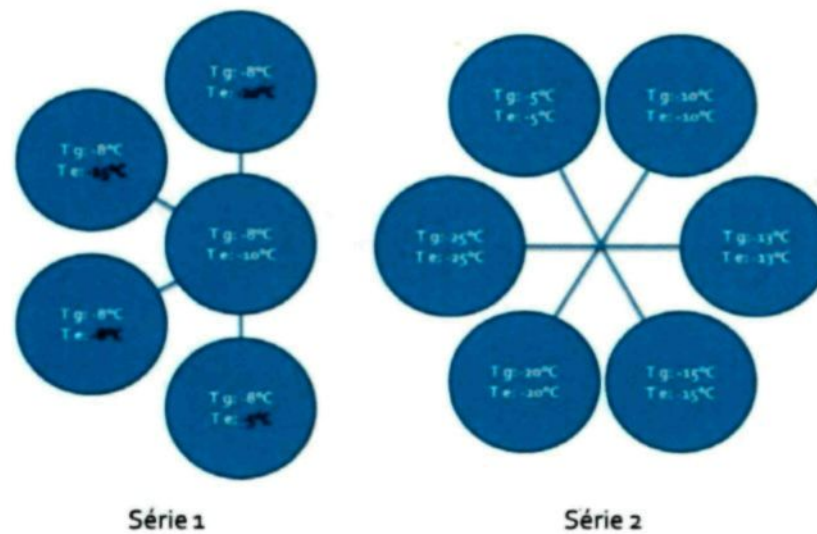
Cette partie présente, dans un premier temps, les résultats des contraintes critiques en cisaillement obtenus avec les essais expérimentaux utilisant le CAT en chambre climatique ainsi que les essais utilisant le SRB en soufflerie réfrigérée. Les fichiers d'essais présentant les résultats bruts pour le CAT et le SRB sont présentés en annexe (B.4 et C.5). Deuxièmement, elle présente les prédictions du modèle pour la valeur de contrainte critique en cisaillement en fonction de la température pour tous les paramètres expérimentaux pour l'aluminium, l'aluminium gravé et le Wearlon®. L'analyse de ces résultats est présentée à la section 4.

#### 3.1 CONDITIONS D'ESSAIS EXPÉRIMENTALES

La Figure 25 schématise les températures de glaçage et les températures d'essais utilisés pour les essais avec le CAT où  $T_g$  représente la température de glaçage et  $T_e$ , la température d'essai.

Deux séries y sont illustrées, dans la première série la température de glaçage est fixée à -8 °C et les températures d'essais varient de -5 à -20 °C alors que pour la deuxième série les températures de glaçage et d'essais sont les mêmes.

Ces deux différentes séries ont été effectuées afin de bien distinguer l'effet de ces deux températures sur la contrainte d'adhérence et leurs influences respectives sur le modèle développé.



**Figure 25 : Représentation des deux séries d'essais avec le CAT**

*(Tg : Température de givrage et Te : Température de l'essai)*

La Figure 26 montre les températures, la dimension des gouttelettes ainsi que la vitesse de rotation pour les différents essais effectués avec le SRB en soufflerie réfrigérée.

Le diagramme présenté à la Figure 26 inclut les conditions standards au centre du schéma et les paramètres changés (en gras) en périphérie (vitesse de rotation, température de l'air et diamètre volumétrique médian des gouttelettes).

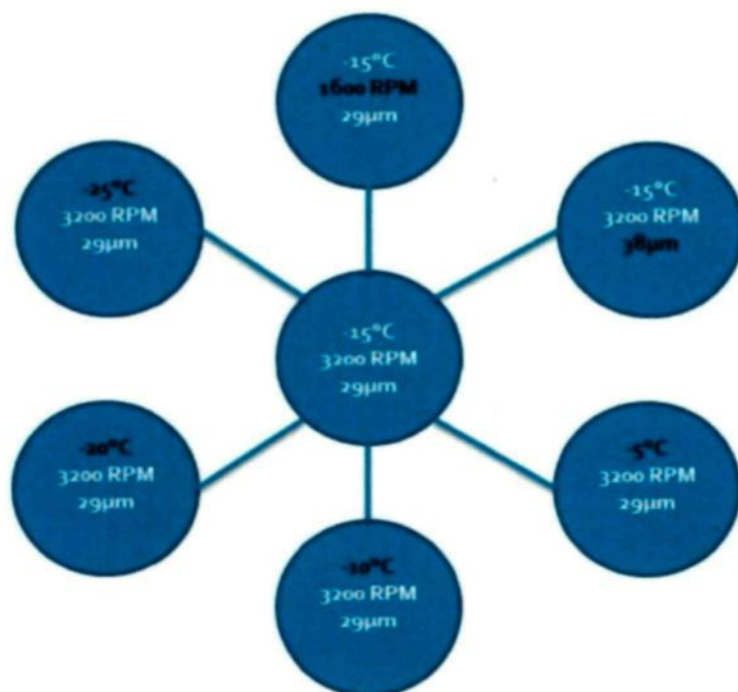


Figure 26 : Paramètres expérimentaux des essais avec le SRB

*(Température de l'essai, vitesse de rotation et diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau en surfusion)*

## 3.2 RÉSULTATS DES ESSAIS EN CHAMBRE CLIMATIQUE (CAT)

### 3.2.1 Température d'accrétion versus température d'essai

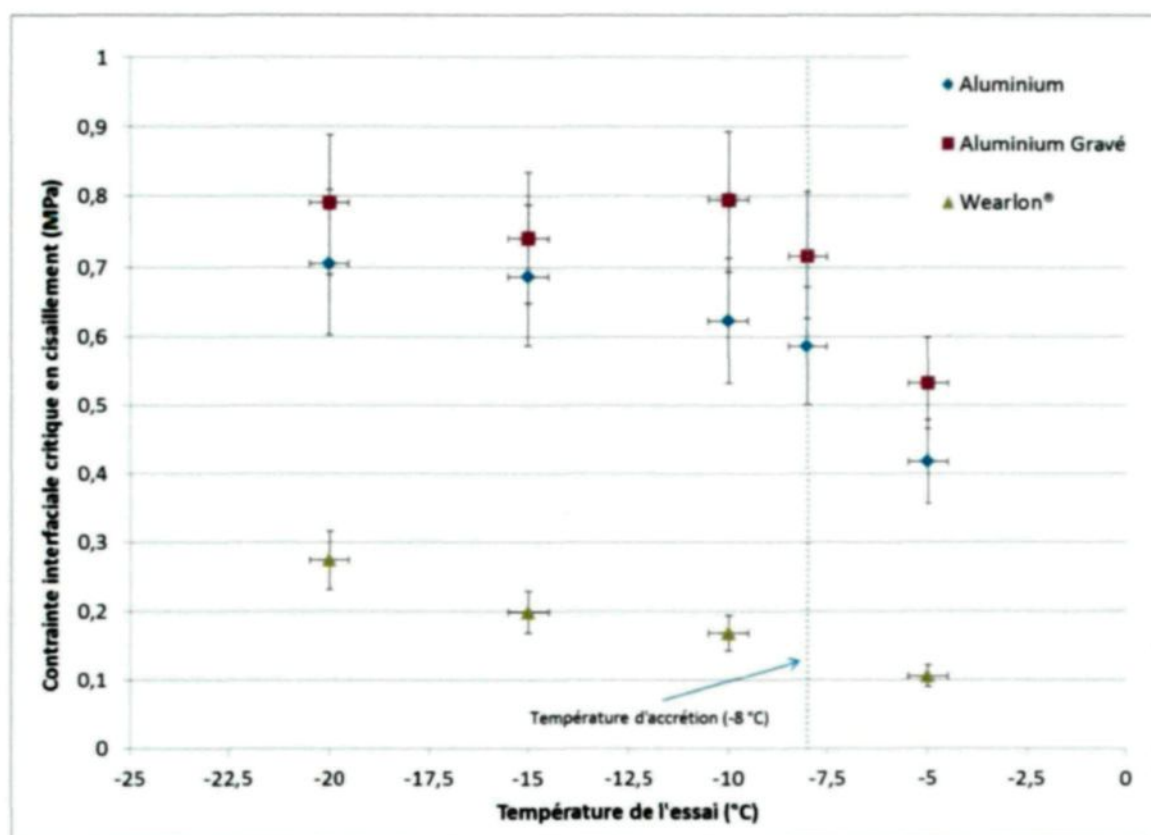
La procédure standard pour les essais de délestage avec le CAT consiste à glacer les poutres à une température de -8 °C et de les déglacer lorsqu'elles sont refroidies à -10 °C [28]. Il est donc primordial de connaître l'impact de la température d'accrétion sur l'adhésion de la glace à un substrat afin d'effectuer des expérimentations en dehors des procédures standards, soient, pour des températures de -5, -10, -13, -15, -20 et -25 °C.

La Figure 27 montre les résultats expérimentaux obtenus pour les essais avec le CAT pour l'aluminium, l'aluminium gravé et le Wearlon® pour une température d'accrétion



de  $-8^{\circ}\text{C}$  et des températures de mesures de contrainte critique à l'interface en cisaillement de  $-5$ ,  $-8$ ,  $-10$ ,  $-15$  et  $-20^{\circ}\text{C}$ . Les résultats y étant présentés correspondent aux valeurs moyennes obtenues avec trois essais. L'erreur expérimentale a été posée comme étant l'écart-type le plus élevé de ces moyennes pour toute la série.

Ces écarts correspondent à 15 %, 13 % et 12 % pour l'aluminium, l'aluminium gravé et le Wearlon® respectivement.



**Figure 27 : Contrainte de cisaillement critique de la glace accrétée à  $-8^{\circ}\text{C}$  pour différente température d'essais avec le CAT<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Les résultats à  $-8^{\circ}\text{C}$  sur le Wearlon® ne sont pas présentés étant donné que les mesures ont été effectuées quelques mois après que le revêtement ait été appliqué sur le substrat et le vieillissement de celui-ci est non négligeable.

La Figure 27 montre les résultats obtenues pour 45 essais avec le CAT dont les glaçages ont été effectués à  $-8^{\circ}\text{C}$  et les essais de délestage à  $-5$ ,  $-8$ ,  $-10$ ,  $-15$  et  $-20^{\circ}\text{C}$ . Pour chacune des températures, trois poutres de chacun des trois substrats ont été glacées et les essais de délestage ont été effectués aux mêmes températures.

Avant de modifier la température de la chambre climatique pour effectuer les essais d'adhésion, un thermocouple, préalablement apposé sur la surface d'une des poutres, permet de vérifier la température des poutres et d'ainsi s'assurer que les échantillons sont en équilibre thermique avec la chambre climatique.

Les résultats pour le Wearlon® présentés à la Figure 27 montre une légère augmentation de la contrainte de cisaillement pour un morceau de glace accréti à  $-8^{\circ}\text{C}$  et refroidi à  $-10$ ,  $-15$  et  $-25^{\circ}\text{C}$ . Les résultats pour l'aluminium et l'aluminium gravé semblent quant à eux suggérer que la contrainte de cisaillement reste constante pour les températures en dessous de la température d'accrétion. Le temps d'attente nécessaire à la thermalisation des poutres avec échantillon de glace à partir de  $-8^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $-25^{\circ}\text{C}$  a été de 4 heures. Il semble donc que la recristallisation partielle de la couche semi-liquide menant à l'épaisseur mesurée pour cette température par Döppenschmidt soit un processus plus lent que le temps d'attente de ces mesures.

Par contre, l'effet d'un réchauffement du morceau de glace accréti à  $-8^{\circ}\text{C}$  est une diminution de la contrainte critique en cisaillement nécessaire au délestage du morceau de glace tel qu'observé pour la température de  $-5^{\circ}\text{C}$  comparativement à la valeur de contrainte à  $-8^{\circ}\text{C}$  et ce pour les trois substrats.

L'hypothèse de la présence d'une fine couche amorphe semi-liquide à l'interface du substrat et de la glace permet d'expliquer le comportement observé de ces mesures expérimentales de la contrainte de cisaillement critique. En effet, pour une température donnée de glaçage, ici de  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , une certaine épaisseur de ce film semi-liquide est présente à l'interface. L'épaisseur dépend de plusieurs facteurs et il n'est pas question ici de justifier ni d'expliquer théoriquement la présence et l'épaisseur de cette couche amorphe, mais seulement d'en supposer l'existence à des fins de modélisation. On peut toutefois envisager que pour une température donnée, l'épaisseur de la couche amorphe dépend de l'équilibre thermique du cristal de glace avec l'environnement extérieur et que lorsque l'équilibre thermique est atteint, l'épaisseur de la couche semi-liquide reste constante dans les temps d'attente utilisés pour ces essais. De cette manière, et en utilisant le fait que cette couche semi-liquide crée une force d'adhésion, on peut donc comprendre que pour une température d'accrétion donnée une certaine force d'adhésion et donc de cisaillement est nécessaire au délestage de la glace.

En modifiant la température, la couche semi-liquide ne se trouve maintenant plus en équilibre thermique avec l'environnement et une modification partielle (fusion ou recristallisation selon la différence de température) s'impose afin de retrouver l'équilibre thermique. Cette modification doit cependant respecter la thermodynamique du système. Selon les résultats obtenus, on peut supposer que la vitesse de recristallisation est lente et qu'une attente de seulement 4 heures ne permet pas une recristallisation significative.

Lorsque l'on augmente la température de la chambre climatique de  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  vers  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  les résultats expérimentaux montrent que la valeur de contrainte diminue. Cette variation

indique que la couche semi-liquide augmente, ce qui veut dire qu'en fournissant de l'énergie au système, il est possible de faire fondre une partie de la glace qui vient augmenter la couche semi-liquide.

À l'inverse, lorsque l'on refroidit le système, la contrainte de cisaillement augmente tel que l'on doit s'y attendre si l'on considère une recristallisation de la couche semi-liquide. Mais cette augmentation reste la même quelle que soit la température à laquelle on refroidit le système en dessous de la température d'accrétion.

On peut alors conclure que la température d'accrétion de la glace doit être celle utilisée pour le calcul de l'épaisseur de la couche semi-liquide. L'épaisseur de la couche semi-liquide se calcule en utilisant l'approximation de Döppenschmidt et al. [25] présenté à la Figure 15.

### **3.2.2 Contrainte de cisaillement critique en fonction de la température**

La Figure 28 présente la contrainte critique en cisaillement obtenu pour les 54 essais avec le CAT pour l'aluminium, l'aluminium gravé et le Wearlon® pour des températures de -5, -10, -13, -15, -20 et -25 °C. Les résultats présentés ici sont les valeurs de contraintes moyennes comme la Figure 27.

L'erreur expérimentale est évaluée de la même manière que dans la première série d'essais et ces écarts correspondent à 15 %, 9 % et 11 % pour l'aluminium, l'aluminium gravé et le Wearlon® respectivement.

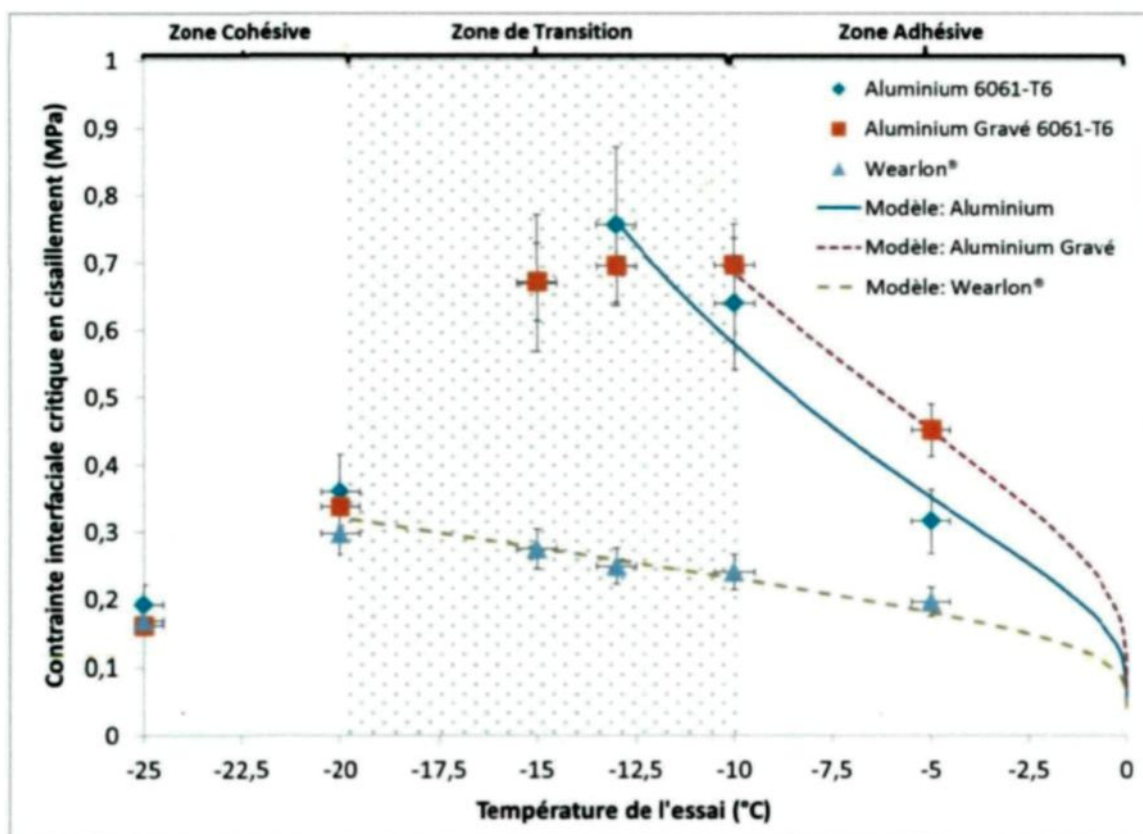


Figure 28 : Contrainte de cisaillement critique de la glace pour les essais utilisant le CAT avec les mêmes températures d'accrétion et de délestage

Les courbes présentées sur ce graphique montrent les prévisions du modèle d'adhésion (équation 6) pour les mêmes conditions expérimentales que les mesures effectuées avec le CAT pour cette série d'essais. Les valeurs utilisées pour les paramètres présents dans cette équation sont présentées dans le Tableau 2. Il est à noter que les valeurs utilisées dans l'équation 6 sont en mètre et en seconde.

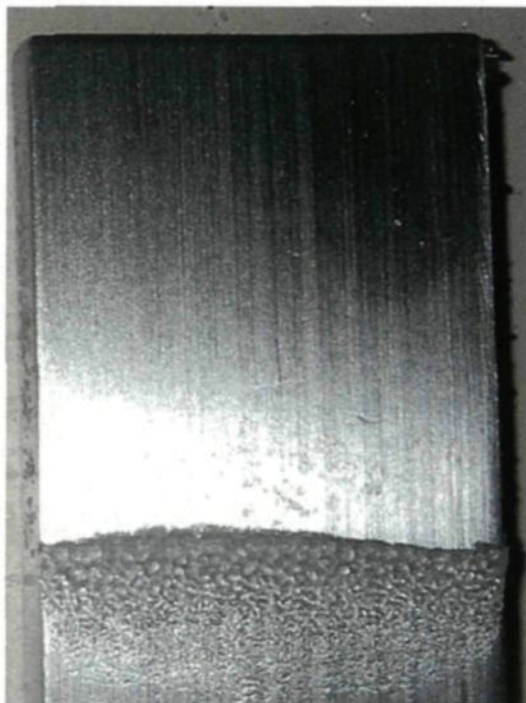
**Tableau 2 : Paramètres expérimentaux (gris) et ajustés (blanc) pour le calcul théorique de l'adhésion pour les essais avec le CAT<sup>2</sup>**

Substrat CAT	R <sub>sm</sub> (μm)	R <sub>a</sub> (μm)	U (m/s)	t <sub>n</sub> (μs)	MVD (μm)
Aluminium	102	0,79	1,65	6,4	303
Aluminium Gravé	110	2,04	1,65	13	303
Wearlon®	509	0,76	1,65	15	303

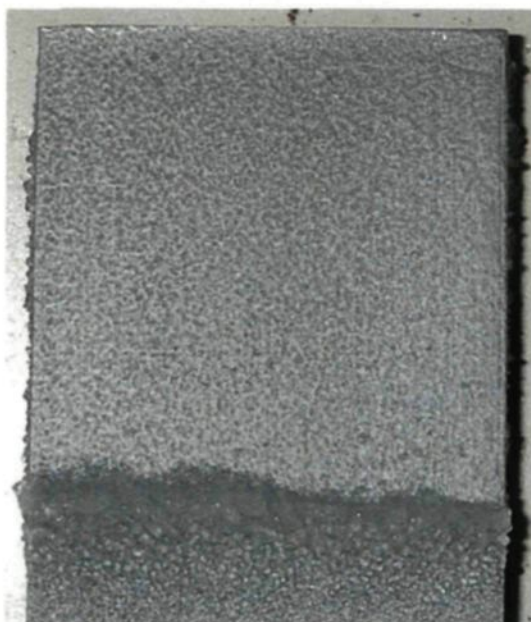
La valeur du temps de nucléation présentée dans ce tableau a été ajustée pour chaque substrat de manière à obtenir la meilleure concordance entre les résultats et les prévisions du modèle d'adhésion. Cet ajustement a été fait étant donné qu'aucune mesure expérimentale n'a encore été effectuée sur le temps de nucléation, ces mesures étant en dehors du cadre de ce mémoire. La validité de ces valeurs sera discutée dans la prochaine section.

Les résultats expérimentaux obtenus avec le CAT dans la deuxième série d'essais ont démontré qu'à partir de -13 °C les bris deviennent mixtes avec une partie cohésive et une partie adhésive. Les photos présentées aux Figures 29, 30 et 31 montrent les bris obtenus sur les poutres d'aluminium, d'aluminium gravé chimiquement et sur le Wearlon® pour une température de -10 °C.

<sup>2</sup> Les mesures de rugosité de surface sont présentées dans l'ANNEXE A



**Figure 29 : Poutre d'aluminium après délestage à -10 °C**



**Figure 30 : Poutre d'aluminium gravé après délestage à -10 °C**

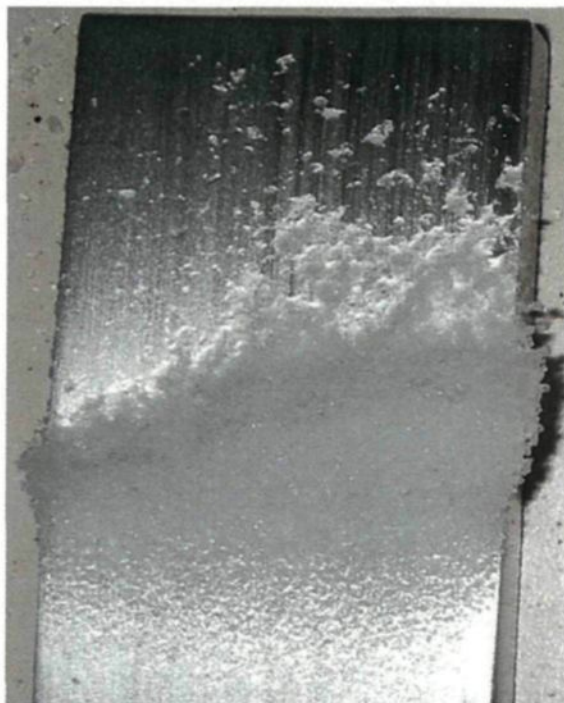


**Figure 31 : Poutre de Wearlon® après délestage à -10 °C**

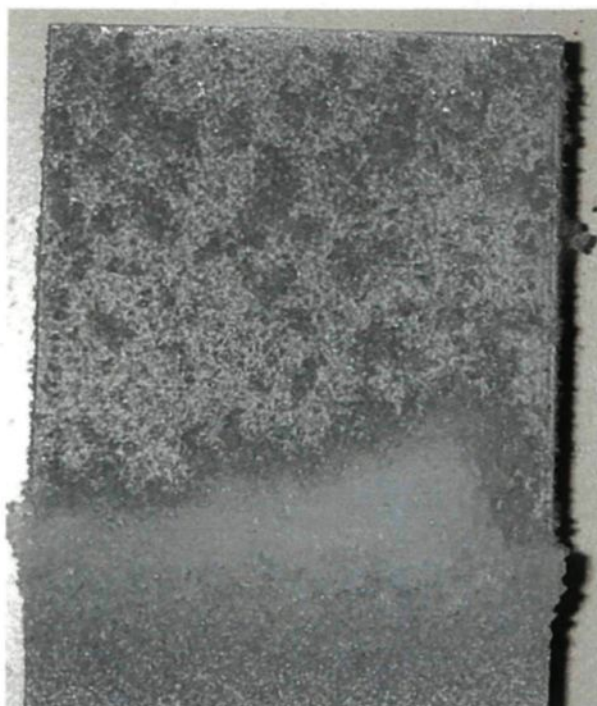
Pour les trois types de substrat, la surface est libre de glace ce qui représente un bris adhésif.

Les photos présentées aux Figures 32, 33 et 34 montrent quant à elles les bris obtenus sur les mêmes poutres pour une température de -13 °C.

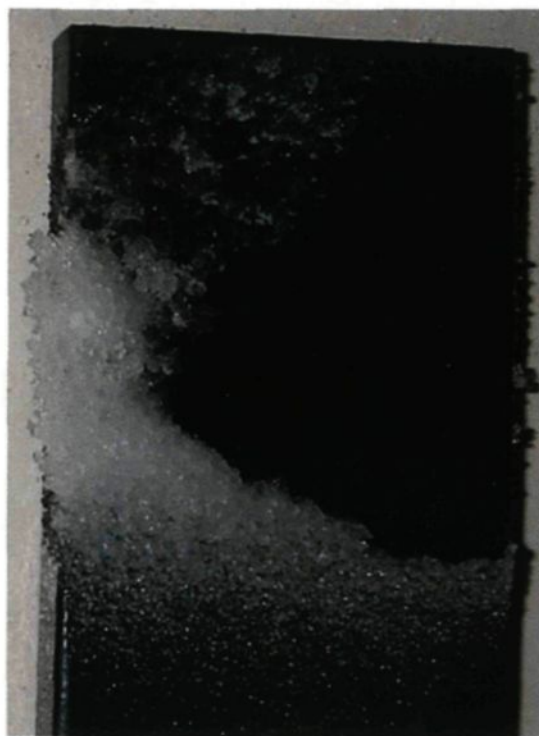




**Figure 32 : Poutre d'aluminium après délestage à -13 °C**



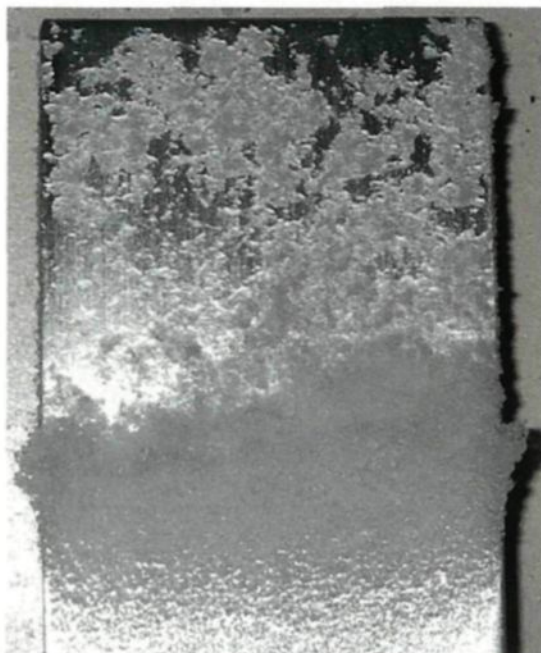
**Figure 33 : Poutre d'aluminium gravé après délestage à -13 °C**



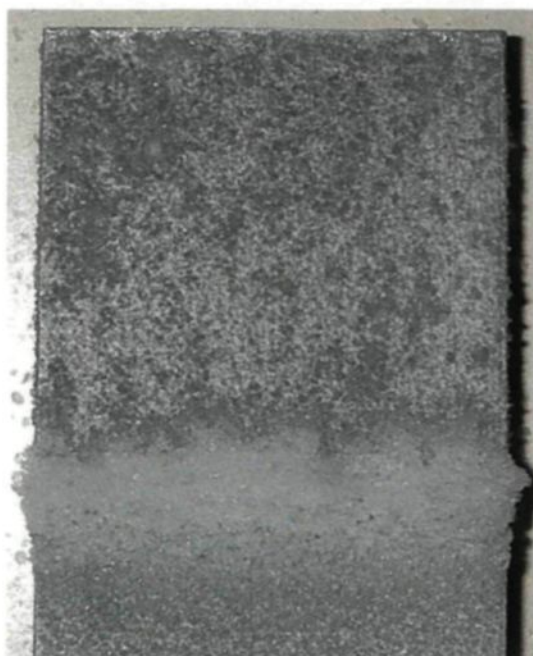
**Figure 34 : Poutre de Wearlon® après délestage à -13 °C**

Contrairement aux photos des poutres à -10 °C, une quantité de glace demeure adhérente à la surface. Ce type de bris est mixte entre adhésif et cohésif.

Les photos présentées aux Figures 35, 36 et 37 montrent les poutres après un délestage à -15 °C.



**Figure 35 : Poutre d'aluminium après délestage à -15 °C**



**Figure 36 : Poutre d'aluminium gravé après délestage à -15 °C**



**Figure 37 : Poutre de Wearlon® après délestage à -15 °C**

À -15 °C, sur l'aluminium et l'aluminium gravé il reste plus de glace que sur le Wearlon®.

Cette observation montre que la valeur d'adhésion de la glace devient égale à la cohésion de la glace en cisaillement pour une température autour de -13 °C pour l'aluminium et de -10 °C pour l'aluminium gravé. Pour le Wearlon®, les bris sont encore à moitié cohésif et moitié adhésif pour la température de -13 °C. Tel que précisé par Jellinek [6], lors de leurs essais sur de la glace obtenue par réfrigération de l'eau sur un substrat d'aluminium, l'adhésion à l'interface et la cohésion à l'intérieur de la glace deviennent égales à une température de -13 °C. Bien que le type de glace utilisée par ce groupe n'est



pas de la glace atmosphérique, les essais d'accrétion de glace en chambre climatique se rapprochent toutefois de ce type de glace étant donnée la faible vitesse d'impact des gouttelettes d'eau surfondue.

Les résultats obtenus pour le Wearlon® semblent indiquer que les bris cohésifs surviennent plutôt à  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  tel que présenté à la Figure 38.



**Figure 38 : Poutre de Wearlon® après délestage à  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$**

La zone de bris mixte observé pour une température de  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  semble donc différente selon le type de substrat sur lequel la glace est accrétée et suggère alors que la densité de la glace, et donc sa cohésion, dépend également du type de substrat en plus de la température.

Suite à ces observations, il appert donc que le modèle d'adhésion de la glace ne peut être utilisé pour les essais avec le CAT lorsque la température d'accrétion et de délestage sont les mêmes que pour une certaine plage de températures pour chacun des substrats. Ces plages de température sont de -5 à -13 °C pour l'aluminium, de -5 à -10 °C pour l'aluminium gravé et de -5 à -20 °C pour le Wearlon®.

### **3.3 RÉSULTATS DES ESSAIS EN SOUFFLERIE RÉFRIGÉRÉE (SRB)**

Les Figures 39, 40 et 41 montrent la contrainte moyenne critique en cisaillement mesurée avec le SRB en soufflerie réfrigérée pour les essais (1 à 3 essais) avec l'aluminium, l'aluminium gravé et le Wearlon®. La méthode de calcul utilisée est celle de la masse, soit, pour les essais dont le délestage de la glace a eu lieu sur une seule pale. La valeur prédite par le modèle en fonction de la température apparaît sous forme de courbe continue.

Selon le rapport produit par Guy Fortin [20], l'erreur expérimentale sur les résultats de la contrainte de cisaillement obtenue en utilisant le SRB en soufflerie réfrigérée correspondant à l'écart type est de  $\pm 27\%$  et sera donc la valeur utilisée.

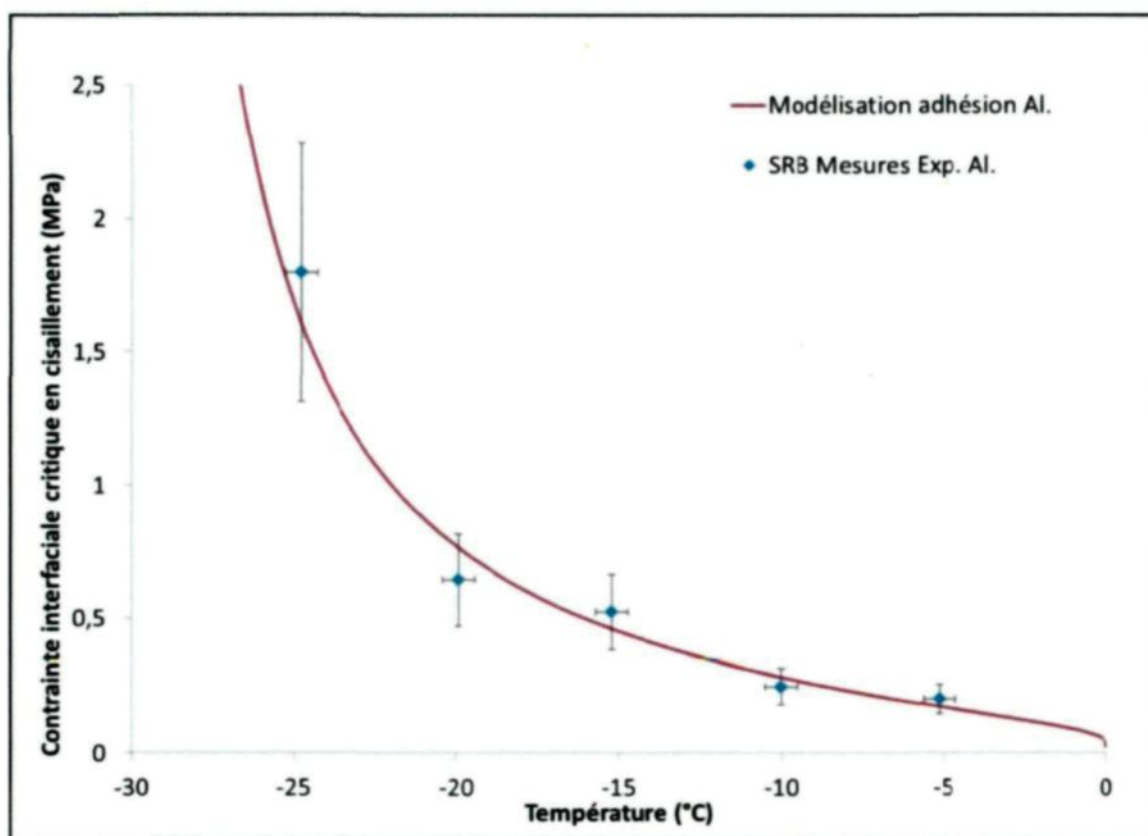


Figure 39 : Contrainte en cisaillement critique moyenne de la glace atmosphérique accrétée sur l'aluminium pour les essais en soufflerie réfrigérée utilisant le SRB

Les mesures effectuées avec le SRB sur l'aluminium montrent que la contrainte interfaciale critique en cisaillement augmente en fonction de la diminution de la température d'accrétion. La valeur de la contrainte passe de  $0,20 \pm 0,05$  MPa à  $-5$  °C jusqu'à  $1,80 \pm 0,49$  MPa à  $-25$  °C. Contrairement aux mesures effectuées avec le CAT sur l'aluminium, les essais avec le SRB sur l'aluminium montrent que pour les températures de  $-5$  à  $-25$  °C il n'existe pas de zone de transition et que les bris à l'interface sont de nature adhésifs.

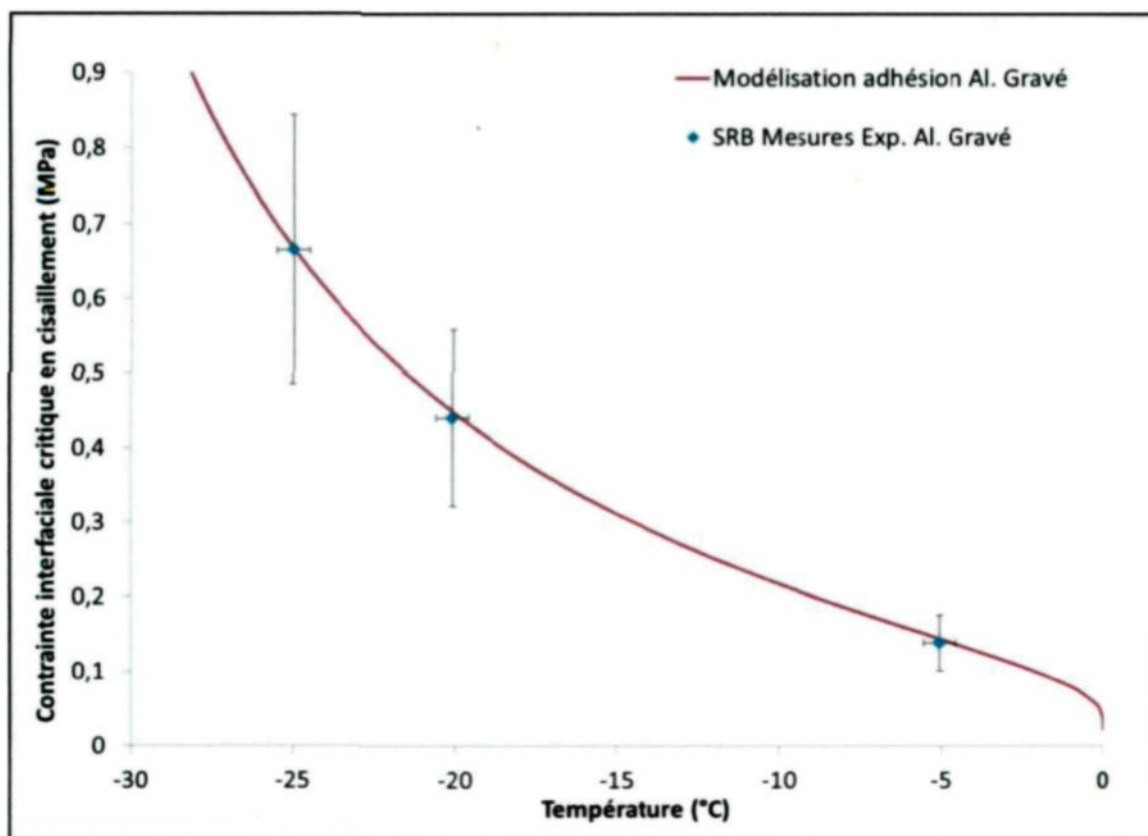


Figure 40 : Contrainte en cisaillement critique moyenne de la glace atmosphérique accrétée sur l'aluminium gravé chimiquement pour les essais en soufflerie réfrigérée utilisant le SRB

Les mesures effectuées avec le SRB sur l'aluminium gravé montrent que la contrainte interfaciale critique en cisaillement augmente en fonction de la diminution de la température d'accrétion. La valeur de la contrainte passe de  $0,14 \pm 0,04$  MPa à  $-5$  °C jusqu'à  $0,66 \pm 0,18$  MPa à  $-25$  °C. Contrairement aux mesures effectuées avec le CAT sur l'aluminium gravé, les essais avec le SRB sur l'aluminium gravé montrent que pour les températures de  $-5$  à  $-25$  °C, il n'existe pas de zone de transition et que les bris à l'interface sont de nature adhésifs.



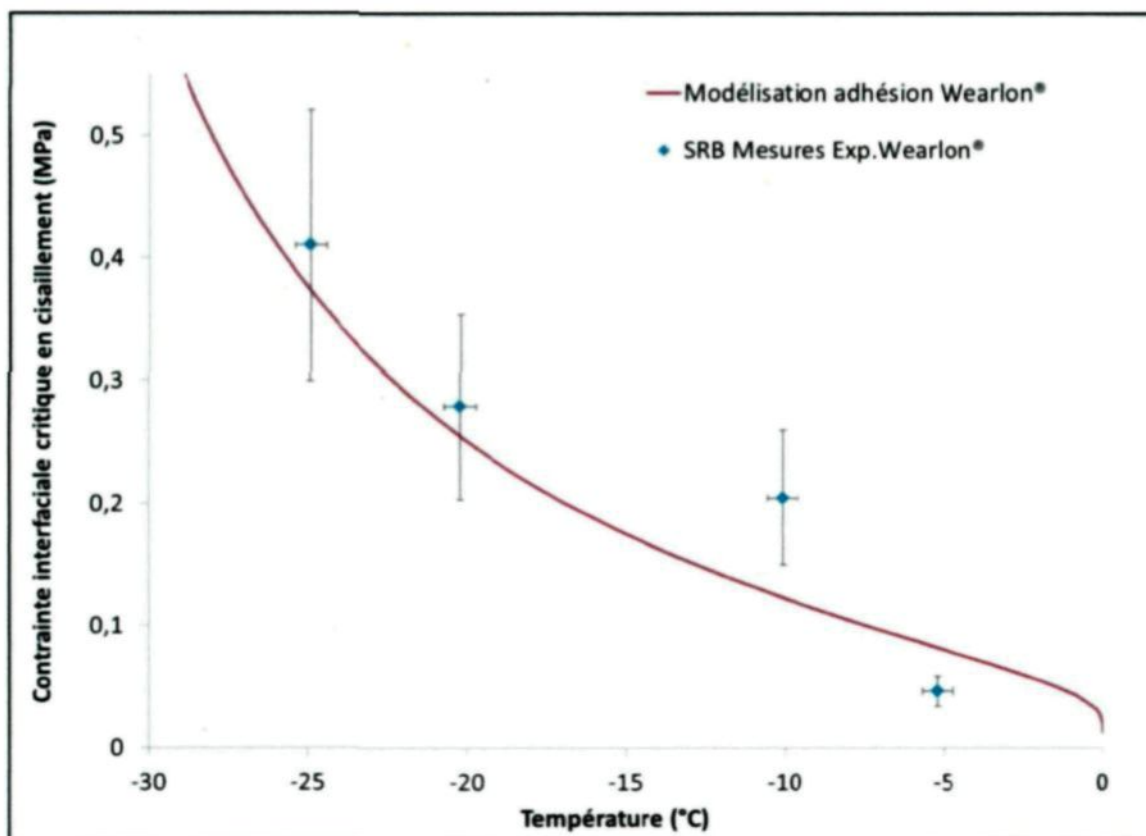


Figure 41 : Contrainte en cisaillement critique moyenne de la glace atmosphérique accrétée sur le Wearlon® pour les essais en soufflerie réfrigérée utilisant le SRB

Les mesures effectuées avec le SRB sur le Wearlon® montrent que la contrainte interfaciale critique en cisaillement augmente en fonction de la diminution de la température d'accrétion. La valeur de la contrainte passe de  $0,05 \pm 0,01$  MPa à  $-5$  °C jusqu'à  $0,66 \pm 0,18$  MPa à  $-25$  °C. Contrairement aux mesures effectuées avec le CAT sur le Wearlon®, les essais avec le SRB sur le Wearlon® montrent que pour les températures de  $-5$  à  $-25$  °C, il n'existe pas de zone de transition et que les bris à l'interface sont de nature adhésifs.

Les courbes de prédictions du modèle (équation 6) utilisent la valeur des paramètres présentés dans le Tableau 3. Il est à noter que les valeurs utilisées dans l'équation 6 sont en mètre et en seconde. Les temps de nucléation utilisés ont été ajustés afin d'obtenir la meilleure corrélation entre le modèle et les résultats expérimentaux.

**Tableau 3: Paramètres expérimentaux (gris) et ajustés (blanc) pour le calcul théorique de l'adhésion pour les essais avec le SRB<sup>3</sup>**

Substrat SRB	$R_{sm}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$U$ (m/s)	$t_n$ ( $\mu\text{s}$ )	MVD ( $\mu\text{m}$ )
Aluminium	71	0,51	98	1,1	27
Aluminium Gravé	154	5,25	104	27	27
Wearlon®	603	1,16	101	30	27

La Figure 42 montre le regroupement des contraintes moyennes critiques en cisaillement mesurées avec le SRB en soufflerie réfrigérée pour l'aluminium, l'aluminium gravé et le Wearlon®.

<sup>3</sup> Les mesures de rugosité de surface sont présentées dans l'ANNEXE A

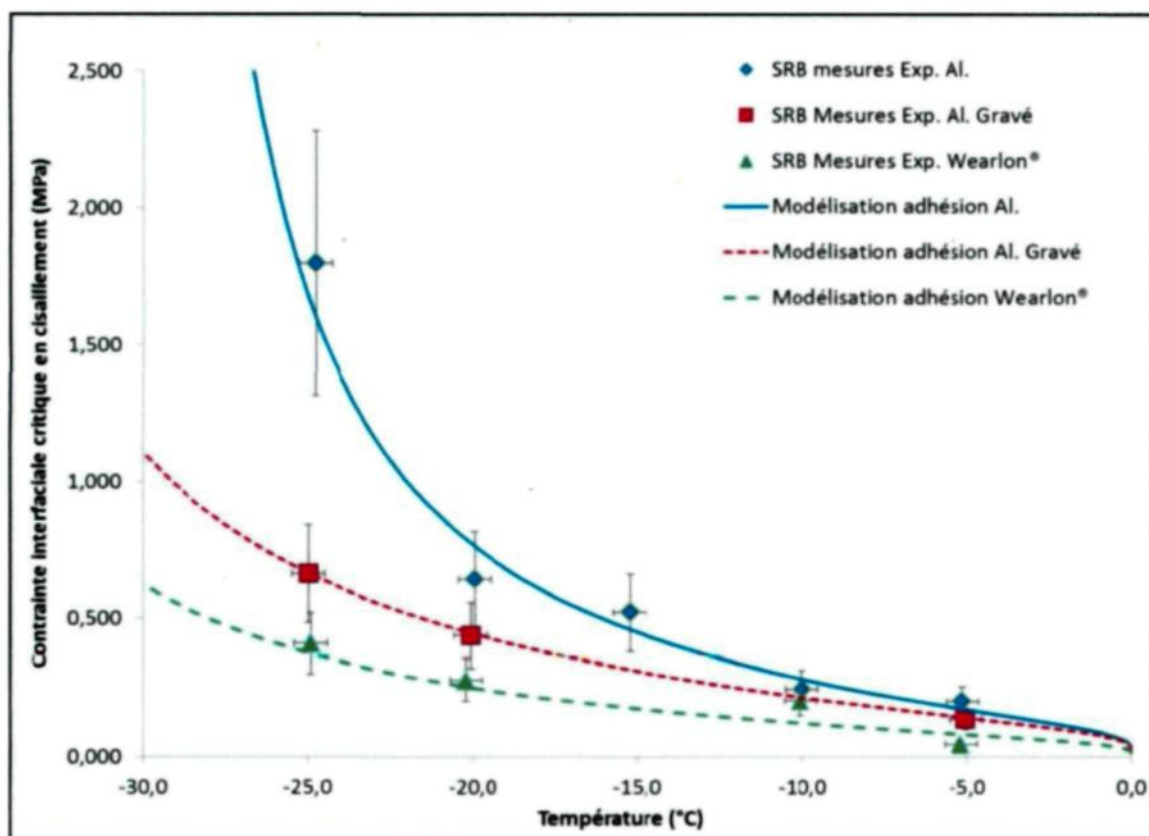


Figure 42 : Regroupement des contraintes moyennes critiques en cisaillement mesurées avec le SRB en soufflerie réfrigérée pour tous les substrats

### 3.4 AJUSTEMENT DE LA COUCHE SEMI-LIQUIDE

La Figure 43 montre l'épaisseur de la couche semi-liquide en fonction de la température pour les trois types de substrats utilisés, soient, l'aluminium, l'aluminium gravé et le Wearlon®. Bien que les paramètres de surface soient différents pour les substrats utilisés avec le CAT et ceux avec le SRB, l'épaisseur de la couche semi-liquide a été posée comme étant la même en fonction de la température pour un même substrat donné. La modification du paramètre  $b$  présenté dans l'équation de Döppenschmidt (voir section 2.1.3.3.3) pour l'épaisseur de la couche semi-liquide a été faite pour chacun des substrats afin d'obtenir la

meilleure concordance entre les prévisions du modèle mathématique d'adhésion et les résultats pour le CAT et le SRB. Il y a donc une seule équation par substrat pour les essais avec le CAT et le SRB.

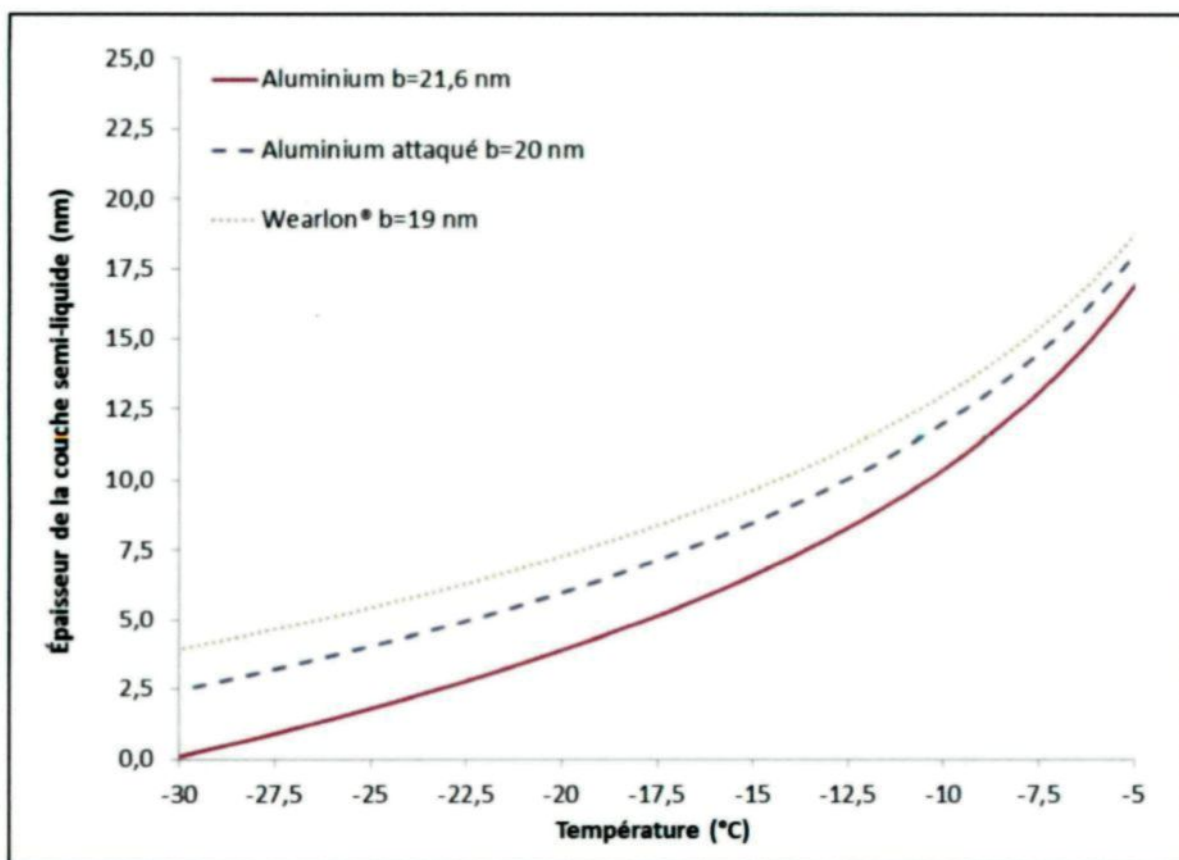


Figure 43 : Épaisseur ajustée de la couche semi-liquide en fonction de la température pour les trois types de substrat

## **CHAPITRE 4**

### **DISCUSSION**

## 4 DISCUSSION

La validation du modèle d'adhérence de la glace atmosphérique sur différents substrats repose sur les mesures de contraintes en cisaillement obtenus avec le CAT en chambre climatique. Ce dernier est utilisé pour cette validation plutôt que le SRB, car il permet de s'affranchir de la contrainte en tension (cohésion) exercée dans la glace accumulée sur une pale en rotation. Effectivement, cette dernière ne peut actuellement pas être calculée théoriquement et la mesure expérimentale n'a pas été effectuée dans le cadre de ce mémoire.

### 4.1 TEMPS DE NUCLÉATION DES ESSAI AVEC LE CAT

Malgré l'ajustement de la valeur du temps de nucléation, la Figure 28 montre que le comportement du modèle permet d'obtenir les bonnes valeurs de cisaillement critique lorsque les bris sont adhésifs pour les essais avec le CAT en fonction de la température et du substrat.

Le Tableau 2 montre les valeurs ajustées du temps de nucléation  $t_n$  pour chacun des substrats, la distance moyenne entre les aspérités de surface  $R_{sm}$ , la rugosité moyenne  $R_a$ , la vitesse d'impact des gouttes  $U$  et la dimension volumétrique médiane des gouttelettes  $MVD$  pour les résultats en chambre climatique utilisant le CAT. Bien que le temps de nucléation dépende de plusieurs facteurs tels que la température de la chambre climatique, la température de surfusion des gouttelettes, la conductivité, la convection, l'évaporation et

le rayonnement thermique, une seule valeur de temps de nucléation a été choisie pour chacun des substrats, et ce dans l'intervalle des températures allant de -5 à -20 °C.

La valeur des temps de nucléation ajustés montre que le temps de nucléation d'une gouttelette d'eau surfondue sur un substrat d'aluminium pour les conditions de givrage du CAT est de 6,4  $\mu$ s comparativement à 13  $\mu$ s et 15  $\mu$ s pour l'aluminium gravé et le Wearlon® respectivement. Bien que l'aluminium gravé soit du même type que l'aluminium non gravé, la gravure chimique augmente la rugosité moyenne de surface du substrat et occasionne alors une diminution de la conductivité thermique en augmentant le volume d'air présent entre la glace et le substrat et donc l'isolation. Cette augmentation de la rugosité semble alors augmenter le temps de nucléation. En effet, le transfert de chaleur entre la goutte et son environnement s'effectue de plusieurs façons, soient, par conductivité, par rayonnement, par convection et par évaporation. En diminuant le transfert par conduction on vient alors diminuer le taux de transfert total ce qui augmente le temps nécessaire au transfert de la chaleur latente provenant de la cristallisation de la gouttelette d'eau surfondue.

En considérant que l'aluminium est le substrat ayant la plus grande conductibilité thermique, suivi de l'aluminium gravé et du Wearlon®, la valeur ajustée obtenue pour le temps de nucléation donne tout de même le bon comportement du point de vue théorique.

Afin de valider le modèle d'adhésion de la glace, il est nécessaire de valider les temps de nucléation ayant été ajustés sur la base des résultats expérimentaux de chaque substrat.

En utilisant le même ratio (seconde par mètre cube) obtenu par Yang pour les gouttelettes millimétriques, on obtient par comparaison pour le volume d'une gouttelette de CAT un temps de nucléation de 4,1  $\mu$ s. Bien que plusieurs facteurs influencent le transfert de la chaleur latente, il appert toutefois que le temps de nucléation ajusté pour les essais avec le CAT sur l'aluminium à 6,4  $\mu$ s est dans le bon ordre de grandeur.

Les conditions expérimentales de Macklin se rapprochent beaucoup de celles utilisées pour les essais faites avec le CAT pour ce qui est de la dimension des gouttelettes, de la température de l'essai et de la vitesse d'impact. La comparaison de l'ordre de grandeur du temps de nucléation ajusté sur les résultats expérimentaux du CAT (6,4  $\mu$ s) à ceux obtenus par Macklin (50  $\mu$ s) montre que le processus de cristallisation est un phénomène qui ne dure que quelques microsecondes. La bonne concordance entre les valeurs de Macklin et les valeurs du CAT permettent alors la validation du modèle d'adhésion de la glace présenté dans ce mémoire.

Bien que le modèle semble ignorer les interactions physico-chimiques entre la glace et le substrat tel que mentionné par Petrenko [9], il s'avère que l'utilisation de la couche semi-liquide, se traduisant par une attraction capillaire entre la glace et le matériau, permet d'englober ces interactions de manière macroscopique et donc, de négliger la quantité des interactions se produisant entre la glace et le substrat. En effet, la force d'adhésion capillaire est, en soi, produite par ces interactions.

Afin de vérifier si le comportement du modèle permet la prévision de l'adhésion de la glace pour des conditions de glaçage plus complexe telle que l'accrétion sur une pale



tournante en soufflerie réfrigérée, la prochaine partie portera sur l'analyse des résultats obtenus avec le SRB sur trois types de substrats.

#### 4.2 ESSAIS EN SOUFFLERIE RÉFRIGÉRÉE

Tout d'abord, il est important de mentionner que les résultats obtenus avec ce montage ne permettent pas réellement de valider le modèle d'adhésion, car les résultats comportent une trop grande variabilité et que plusieurs approximations sont faites dans le calcul de la contrainte de cisaillement critique. La variabilité est principalement due au phénomène en soi, givrage-délestage, qui par sa nature comporte plusieurs éléments stochastiques. De plus, une certaine part de celle-ci semble provenir de la modification du taux d'humidité relative à l'intérieur même de la soufflerie lors de plusieurs essais consécutifs. L'augmentation de l'humidité à l'intérieur de la soufflerie semble agir directement sur l'épaisseur de la couche semi-liquide présente à l'interface glace/substrat en modifiant la pression de vapeur et donc le pourcentage d'évaporation de cette couche amorphe. On pourrait alors s'attendre à une diminution de la contrainte de cisaillement mesurée entre deux essais consécutifs ayant les mêmes conditions de givrage, mais un taux d'humidité plus élevé.

Malgré cette grande variabilité des résultats qui se traduisent ici par une grande incertitude sur les valeurs de contrainte mesurées, les résultats obtenus seront utiles afin de comparer sommairement les prévisions du modèle d'adhésion pour un phénomène ayant une plus grande complexité que l'accrétion en chambre climatique.

#### **4.2.1 Aluminium en soufflerie réfrigérée**

##### **4.2.1.1 Première condition de givrage : effet de la température**

La première condition de givrage utilise un vent de 15 m/s, un MVD de  $27 \pm 3 \mu\text{m}$ , un LWC de  $0,7 \text{ g/m}^3$  et une vitesse de rotation des pales de 3200 RPM pour des températures de -5, -10, -15, -20 et -25 °C.

Ces conditions permettent de vérifier l'impact de la modification de la température sur les valeurs de cisaillement critiques et de vérifier si le modèle prévoit correctement cette variation.

La Figure 39 montre les résultats obtenus pour les essais sur l'aluminium effectués sous la première condition de givrage.

Les résultats utilisés sont ceux provenant des essais avec le SRB en soufflerie réfrigérée dont une seule des deux pales a subi un délestage de glace. La déviation standard de 27 % sur les mesures de contraintes critique en cisaillement avec le SRB semble importante, mais, comme il a été mentionné précédemment, le phénomène d'accrétion sur une pale en rotation est un phénomène complexe dont les paramètres sont difficiles à reproduire totalement. Plusieurs facteurs sont incontrôlables d'un essai à l'autre tel que l'humidité relative à l'intérieur même de la soufflerie. Les essais expérimentaux ont montré que deux essais consécutifs effectués sur l'aluminium pour les mêmes conditions de givrage donnent de grandes variations quant à la valeur d'adhésion. La cause la plus probable de cette variation est le pourcentage d'humidité relative qui modifie l'épaisseur de la couche semi-liquide. Étant donné qu'aucune sonde d'hygrométrie n'était présente à

l'intérieur de la soufflerie durant les essais effectués dans le cadre de ce mémoire, il est donc impossible de prendre en compte cette variation dans le calcul théorique de l'adhésion de la glace.

Malgré tout, l'utilisation des paramètres mesurés et présentés dans le Tableau 3 ainsi que ceux tirés de la littérature telle que l'équation empirique de Döppenschmidt pour l'épaisseur de la couche semi-liquide en fonction de la température, les mesures de tension superficielle de l'eau surfondue effectuées par Hacker [24], les angles de contacts entre la couche amorphe et le cristal de glace [29] et le substrat ainsi que l'ajustement graphique du temps de nucléation ont permis de montrer que le comportement de l'équation 6 est en accord avec les résultats pour la valeur de la contrainte critique en cisaillement obtenus avec le SRB sur l'aluminium.

#### **4.2.1.1.1 Temps de nucléation**

En posant le temps de nucléation à  $1,1 \mu\text{s}$  et en le supposant constant pour toutes les températures, la courbe théorique concorde avec les résultats expérimentaux.

Pour la deuxième série d'essais sur l'aluminium avec le CAT, la valeur du temps de nucléation obtenu est de  $6,4 \mu\text{s}$  alors que celle obtenue pour l'aluminium avec le SRB est de  $1,1 \mu\text{s}$ . Cette différence s'explique par le fait que l'échange thermique par conduction est la même, mais que l'échange par convection est beaucoup plus grand à l'intérieur de la soufflerie réfrigérée que dans la chambre climatique. Bien que les surfaces d'échange thermique convectives sont beaucoup plus petites sur une gouttelette de  $27 \mu\text{m}$  qu'une gouttelette de  $303 \mu\text{m}$ , l'énergie totale à transférer provenant de la chaleur latente due à la

crystallisation est elle-même plus petite. On se doit également de considérer que le substrat échange aussi de la chaleur par convection avec l'environnement ce qui vient augmenter le taux de transfert total.

De plus, la valeur du temps de nucléation est également dans le bon ordre de grandeur pour ce processus lorsque l'on compare aux résultats du CAT.

#### 4.2.1.1.2 Transition adhésion-cohésion

En comparant les résultats à ceux du CAT, on remarque l'absence de bris cohésifs et donc de zone de transition entre les bris adhésifs et cohésifs pour tous les essais effectués avec le SRB. La différence entre les conditions de givrages, plus spécifiquement la dimension des gouttelettes et leurs vitesses d'impact sur le substrat, semble expliquer cette observation.

En effet, lorsque l'on examine l'équation empirique de Laforte et al. [30] permettant l'approximation de la masse volumique de la glace en fonction de la température et de la vitesse d'impact (équation 22), on remarque que, selon les conditions du CAT et du SRB, cette masse volumique varie de 917 à 812 kg/m<sup>3</sup> de 0 à -25 °C pour le CAT et de 917 à 895 kg/m<sup>3</sup> de 0 à -25 °C pour le SRB.

$$\rho = \rho_{\max} \left( \frac{MVD \cdot U}{MVD \cdot U + 0,0000026(T_{fus} - T)} \right) \quad (22)$$

La cohésion de la glace étant directement liée à la masse volumique de celle-ci, on peut alors avancer l'hypothèse que la zone de transition entre l'adhésion et la cohésion doit également exister pour les essais avec le SRB mais que celle-ci se situe en dessous

de -25 °C étant donné la plus grande masse volumique de la glace en soufflerie réfrigérée que celle en chambre climatique.

Malgré la grande variabilité des résultats obtenus avec le SRB et la plus grande complexité du phénomène d'accrétion qu'avec le CAT, le modèle d'adhésion de la glace élaboré dans ce mémoire permet d'obtenir le bon comportement de l'adhésion et concorde avec les résultats expérimentaux obtenus avec l'aluminium pour ces conditions de givrage.

On peut alors conclure de ces essais que le modèle permet de prendre en considération la variation de température d'accrétion dans le calcul de l'adhésion de la glace sur une pale en rotation dans un milieu givrant.

#### **4.2.1.2 Deuxième condition de givrage : effet de la vitesse de rotation**

La deuxième condition de givrage utilise un vent de 15 m/s, un MVD de  $27 \pm 3 \mu\text{m}$ , un LWC de  $0,7 \text{ g/m}^3$  et une vitesse de rotation des pales de 1600 RPM pour une seule température d'essai de -15 °C.

Ces conditions permettent de vérifier l'impact d'une modification de la vitesse d'impact sur les valeurs de cisaillement critiques et de vérifier si le modèle prévoit correctement cette variation. La modification de la vitesse de rotation des pales modifie la vitesse d'impact des gouttelettes à la surface du substrat et modifie également l'échange thermique par convection.

Étant donné que le modèle d'adhésion est dépendant de la vitesse d'impact et du temps de nucléation, on ne peut pas appliquer seulement le changement de la vitesse

d'impact pour obtenir une comparaison entre les prévisions du modèle et les résultats expérimentaux.

Selon les équations de transfert de chaleur [31], le flux d'échange thermique par convection en régime turbulent est donné par l'équation 23.

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A_{conv} \Delta T \quad (23)$$

L'échange thermique est donc directement proportionnel au coefficient de convection.

Le coefficient de convection est donné par l'équation 24.

$$h_c = \frac{\lambda Nu}{d} \quad (24)$$

Avec la conductivité de l'air  $\lambda$ , le nombre de Nusselt  $Nu$  et la longueur caractéristique  $d$ . Le coefficient de convection est également directement proportionnel au nombre de Nusselt.

Le nombre de Nusselt pour un transfert thermique par convection forcé en régime turbulent applicable aux essais en soufflerie réfrigérée est donné par l'équation 25.

$$Nu = 0,036 \left[ \frac{\rho \nu C_p}{\lambda} \right]^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{Ud}{\nu} \right]^{\frac{4}{5}} \quad (25)$$

Avec la masse volumique  $\rho$ , la viscosité cinématique  $\nu$ , la chaleur spécifique  $C_p$  et la conductivité thermique  $\lambda$  de l'air, la vitesse de l'écoulement  $U$ , la dimension caractéristique  $d$ .

Étant donné que seule la vitesse de l'écoulement varie entre les conditions de givrage 1 et 2 et du fait que l'échange thermique par conduction et rayonnement est indépendant de la vitesse de l'écoulement, il est possible de comparer la variation sur le temps de nucléation en utilisant l'équation 26.

$$\frac{\dot{Q}_{convec}^{3200\text{ RPM}}}{\dot{Q}_{convec}^{1600\text{ RPM}}} = \frac{U_{3200\text{ RPM}}^{4/5}}{U_{1600\text{ RPM}}^{4/5}} \quad (26)$$

On obtient alors un rapport de 1,8 entre le temps de nucléation à 3200 RPM versus celui à 1600 RPM.

Le temps de nucléation ajusté pour l'aluminium dans la première condition de givrage étant de 1,1  $\mu\text{s}$ , cela donne alors un temps de 1,95  $\mu\text{s}$  estimé pour la deuxième condition de givrage.

La moyenne des trois essais effectués à 1600 RPM sur l'aluminium donne un cisaillement critique de  $0,5 \pm 0,1 \text{ MPa}$  à  $-15^\circ\text{C}$ .

La prévision du modèle (équation 6) donne quant à elle 0,52 MPa si l'on utilise un temps de nucléation de 1,95  $\mu\text{s}$  et une vitesse d'impact de 48 m/s correspondant à la vitesse d'impact moyenne sur la longueur de délestage moyenne pour les essais à 1600 RPM.

On peut alors conclure de ces essais que le modèle permet de prendre en considération la variation de la vitesse d'impact lorsque l'on calcule la variation du temps de nucléation provoqué par cette variation de vitesse et donc de transfert convectif.

#### 4.2.1.3 Troisième condition de givrage : effet de la dimension des gouttelettes

La troisième condition de givrage utilise un vent de 15 m/s, un MVD de  $38 \pm 4 \mu\text{m}$ , un LWC de  $0,8 \text{ g/m}^3$  et une vitesse de rotation des pales de 3200 RPM pour une seule température d'essai à  $-15^\circ\text{C}$ . Les seuls essais effectués dans ces conditions ont été effectués sur l'aluminium.

Ces conditions permettent de vérifier l'impact d'une modification de la dimension volumétrique médiane des gouttelettes sur les valeurs de cisaillement critiques et de vérifier si le modèle prévoit correctement cette variation.

Bien que la modification de la dimension des gouttelettes agit directement sur le temps de nucléation étant donnée l'augmentation de la chaleur latente à transférer. On posera ici que la faible variation du diamètre a un impact négligeable sur cette valeur étant donné l'augmentation de l'aire de transfert par convection et par conduction résultante de cette augmentation du diamètre.

La moyenne des deux essais effectués sur l'aluminium en soufflerie réfrigérée utilisant les gouttelettes de  $38 \mu\text{m}$  donne une valeur de cisaillement critique de  $0,366 \pm 0,099 \text{ MPa}$ .

Lorsque l'on calcule théoriquement avec l'équation 6 en utilisant les paramètres utilisés dans la première condition de givrage et en remplaçant la dimension des gouttelettes par  $38 \mu\text{m}$ , on obtient une valeur de contrainte critique en cisaillement pour l'adhésion de  $0,32 \text{ MPa}$ .



On peut alors conclure de ces essais que le modèle d'adhésion permet de prendre en compte la dimension des gouttelettes dans le calcul de l'adhésion de la glace étant donné que la valeur théorique se trouve à l'intérieur de l'incertitude de la mesure expérimentale.

#### **4.2.2 Aluminium gravé en soufflerie réfrigérée**

##### **4.2.2.1 Première condition de givrage : effet de la température**

Les paramètres de givrage utilisés pour ces essais sont les mêmes que ceux de la première condition de givrage sur l'aluminium (section 4.2.1.1).

La Figure 40 montre les résultats obtenus pour les essais sur l'aluminium gravé chimiquement effectués sous la première condition de givrage. Les résultats utilisés sont ceux provenant des essais avec le SRB en soufflerie réfrigérée dont une seule des deux pales a subi un délestage de glace.

Les paramètres du substrat utilisés dans l'équation 6 permettant le calcul théorique de l'adhésion de la glace sont ceux présentés dans le Tableau 3. Le temps de nucléation a été ajusté sur les résultats expérimentaux à 27  $\mu\text{s}$ .

Le temps de nucléation est plus élevé que celui obtenu pour l'aluminium dans les mêmes conditions et reste toutefois dans le bon ordre de grandeur. Cette différence de temps provient de la plus faible conductivité thermique de l'aluminium gravé comparativement à l'aluminium et qui vient diminuer la vitesse de transfert thermique.

Ce résultat concorde avec celui obtenu avec le CAT pour ce substrat où le temps de nucléation était de 13  $\mu\text{s}$ .

Lorsque l'on compare le temps de nucléation de l'aluminium gravé pour les essais avec le CAT et celui avec le SRB on remarque que le temps pour le SRB est plus grand que pour le CAT. Bien que la convection soit plus grande et la dimension des gouttelettes plus petite dans la soufflerie réfrigérée, la rugosité du substrat est environ 2 fois plus grande pour la pale que pour la poutre. Cette différence de rugosité affecte directement le transfert par conduction entre la gouttelette et le substrat. Étant donné que le transfert par conduction est le processus d'échange le plus rapide, il est alors compréhensible que le temps de nucléation pour le CAT soit deux fois plus petit que celui du SRB.

Ces essais sur l'aluminium gravé montrent que le modèle prévoit le bon comportement pour la valeur de cisaillement critique mesuré expérimentalement en fonction de la température.

Il est intéressant de noter que les essais avec le CAT (voir Figure 28) ont montrées une valeur plus élevée pour la contrainte critique en cisaillement de l'aluminium gravé que pour l'aluminium alors que les essais avec le SRB (voir Figure 42) montrent que cette contrainte est plus élevée pour l'aluminium que pour l'aluminium gravé. En regardant le Tableau 2, on remarque que la rugosité moyenne ( $R_a$ ) de l'aluminium gravé (2,04  $\mu\text{m}$ ) est beaucoup plus élevée que celle de l'aluminium (0,79  $\mu\text{m}$ ) ce qui permet alors un plus grand ancrage mécanique de la glace à l'intérieure des rugosités de l'aluminium gravé. Cet ancrage mécanique explique donc la plus grande contrainte en cisaillement nécessaire pour le délestage de la glace à la surface de l'aluminium gravé lors des essais avec le CAT.

Le Tableau 3 montre quant à lui que la rugosité moyenne ( $R_a$ ) et la distance interpic moyenne ( $R_{sm}$ ) varient entre l'aluminium et l'aluminium gravé. En effet, la rugosité moyenne de l'aluminium gravé est de  $5,25 \mu\text{m}$  comparativement à  $0,51 \mu\text{m}$  pour l'aluminium et la distance interpic moyenne est de  $154 \mu\text{m}$  pour l'aluminium gravé et de  $71 \mu\text{m}$  pour l'aluminium. Il est à noter que le diamètre volumétrique médian utilisé pour les essais avec le SRB est de  $27 \mu\text{m}$ . Les gouttelettes d'eau surfondue sont alors plus petites que la distance interpic moyenne et celle-ci se retrouvent donc entre les rugosités tel que représenté pour l'aluminium à la Figure 44.



**Figure 44 : Représentation d'une gouttelette d'eau à la surface de l'aluminium pour les essais en soufflerie réfrigérée**

Lorsque la surface du substrat est entièrement recouverte de glace, deux phénomènes définissent la contrainte en cisaillement nécessaire au délestage du morceau de glace. Le premier est l'épaisseur de la couche semi-liquide qui dépend de la température de glaçage ainsi que des propriétés thermique du substrat. Le second vient des aspérités de surface et qui permettent un ancrage à la glace. Le nombre d'aspérités présent à l'intérieur de la glace est défini par la distance interpic moyenne. En effet, un substrat ayant une grande distance

interpic moyenne offre peut de d'ancrage à la glace comparativement à un substrat ayant une faible distance interpic moyenne. C'est ce phénomène qui explique le fait que la contrainte critique en cisaillement de l'aluminium gravé soit plus faible que celle de l'aluminium lors des essais avec le SRB en soufflerie réfrigérée.

#### **4.2.2.2 Deuxième condition de givrage : effet de la vitesse de rotation**

Les paramètres de givrage utilisés pour ces essais sont les mêmes que ceux de la deuxième condition de givrage sur l'aluminium (section 4.2.1.2).

Étant donné qu'aucun essai n'a permis d'obtenir de délestage sur une seule pale, les essais ont été rejetés et aucune valeur de cisaillement critique n'a été obtenue pour ces conditions de givrage sur l'aluminium gravé.

#### **4.2.3 Wearlon® en soufflerie réfrigérée**

##### **4.2.3.1 Première condition de givrage : effet de la température**

Les paramètres de givrage utilisés pour ces essais sont les mêmes que ceux de la première condition de givrage sur l'aluminium (section 4.2.1.1).

La Figure 41 montre les résultats de la contrainte en cisaillement critique mesuré avec le SRB sur le Wearlon® dans les premières conditions de givrage.

Les résultats utilisés sont ceux provenant des essais avec le SRB en soufflerie réfrigérée dont une seule des deux pales a subi un délestage de glace.

Les paramètres du substrat utilisés dans l'équation 6 permettant le calcul théorique de l'adhésion de la glace sont ceux présentés dans le Tableau 3. Le temps de nucléation a été ajusté sur les résultats expérimentaux à 30  $\mu\text{s}$ .

On remarque que le temps de nucléation du Wearlon® est plus élevé que celui de l'aluminium ainsi que de l'aluminium gravé pour les mêmes conditions de givrage. Cette observation s'explique par la différence de conductivité thermique des substrats. Les substrats dont la conductivité thermique est plus faible ont un temps de nucléation plus long du fait que le transfert thermique ne s'effectue que par convection.

#### **4.2.3.2 Deuxième condition de givrage : effet de la vitesse de rotation**

Les paramètres de givrage utilisés pour ces essais sont les mêmes que ceux de la deuxième condition de givrage sur l'aluminium (section 4.2.1.2).

La variation de la vitesse d'impact provenant de la modification de la vitesse de rotation des pales influence directement le transfert thermique par convection telle que présentée dans la section 4.2.1.2 pour les essais sur l'aluminium.

Le calcul effectué pour l'aluminium montre un facteur 1,8 entre le temps de nucléation à 3200 RPM versus celui à 1600 RPM.

Le temps de nucléation obtenu pour le Wearlon® dans les premières conditions de givrage est de 30  $\mu\text{s}$ . En augmentant ce temps d'un facteur 1,8, on obtient alors un temps de nucléation de 53,1  $\mu\text{s}$ .

Le calcul théorique pour la valeur de l'adhésion de la glace sur un substrat de Wearlon® utilisant ce temps de nucléation et la vitesse moyenne (47 m/s) pour les essais à 1600 RPM ainsi que les valeurs présentées dans le Tableau 3 pour la rugosité moyenne et l'espacement moyen entre les aspérités de surface donne une valeur d'adhésion de 0,27 MPa.

Les résultats expérimentaux obtenus pour ces conditions de givrage sur le Wearlon® donnent quant à eux une valeur de  $0,24 \pm 0,06$  MPa à -15 °C.

Le modèle permet donc de prendre en considération la variation de la vitesse d'impact des gouttelettes sur le substrat et le temps de nucléation varie en fonction de cette vitesse en modifiant le transfert thermique par convection entre la gouttelette et l'écoulement d'air.

#### 4.3 ÉPAISSEUR DE LA COUCHE SEMI-LIQUIDE

La Figure 43 montre l'ajustement mineur effectué sur l'équation de Döppenschmidt permettant le calcul de l'épaisseur de la couche semi-liquide en fonction de la température.

Cet ajustement a permis de modifier légèrement le comportement du modèle d'adhésion pour les plus basses températures en faisant varier la rapidité à laquelle la courbe augmente. De plus, une seule courbe ajustée a été utilisée pour l'aluminium avec le CAT et le SRB et l'ajustement du paramètre  $b$  a été effectué afin d'optimiser les deux courbes d'adhésion prévue par le modèle sur les résultats du CAT et du SRB.

On remarque de cette figure que la couche semi-liquide semble être directement liée à la conductivité thermique du substrat. En effet, l'aluminium qui a la plus grande

conductivité thermique est le substrat avec une plus petite couche semi-liquide tandis que le Wearlon®, presque isolant, est le substrat qui a la plus grande épaisseur de couche semi-liquide.

Cette observation suggère que le transfert par conduction permet la cristallisation d'une plus grande partie de la couche semi-liquide et explique alors l'adhésion plus élevée des matériaux conducteurs.

## **CHAPITRE 5**

### **CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**



## 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 5.1 CONCLUSIONS

Ce mémoire présente l'élaboration d'un modèle mathématique d'adhésion de la glace atmosphérique permettant d'obtenir une courbe prévisionnelle de la contrainte de cisaillement critique nécessaire au bris d'adhérence sur un substrat soumis à des conditions givrantes. Ce modèle, basé sur l'adhésion capillaire provenant de la couche semi-liquide à l'interface glace/substrat, prend en compte les propriétés physiques du substrat ainsi que les conditions environnementales de givrage.

Les résultats expérimentaux effectués dans le cadre de ce mémoire proviennent de mesures effectuées avec le CAT sur des échantillons de glace accrétée en chambre climatique ainsi que sur des accrétions de glace sur pale en rotation dans la soufflerie réfrigérée utilisant le SRB.

Le modèle d'adhésion de glace atmosphérique a été validé en utilisant les résultats obtenus avec le CAT, car ils sont reproductibles et fiables. En effet, le modèle d'adhésion permet de reproduire le comportement observé avec le CAT pour l'adhésion de la glace atmosphérique sur un substrat pour différentes températures d'accrétion. Les temps de nucléation ajustés aux résultats expérimentaux sont dans le bon ordre de grandeur comparativement à ceux de la littérature et la variation de ce temps de nucléation d'un substrat à un autre suit la logique de la théorie du transfert de la chaleur. Les résultats expérimentaux montrent également l'importance de la température d'accrétion vis-à-vis

celle au délestage et l'hypothèse de la couche semi-liquide permet d'expliquer ce comportement.

Le modèle a également été comparé aux résultats des essais de SRB en soufflerie réfrigérée et la concordance entre le modèle et les résultats restent toutefois satisfaisants malgré la variation des résultats obtenus avec cet appareil. De plus, ces comparaisons permettent de montrer que le comportement du modèle est en accord avec les mesures expérimentales effectuées sous diverses conditions givrantes et sur trois types de substrats.

Finalement, l'hypothèse de la couche semi-liquide et son importance sur l'adhésion de la glace donnent de très bonnes prévisions et permettent d'obtenir le comportement observé expérimentalement pour l'adhésion de la glace atmosphérique en fonction du type de substrat et des conditions de givrage. Bien que le modèle utilise plusieurs approximations, il reste toutefois important de considérer qu'une modélisation plus détaillée permettrait sans aucun doute d'améliorer grandement la justesse du modèle d'adhésion vis-à-vis des résultats expérimentaux et que la prise en compte de tous les paramètres de givrage tels que l'humidité relative et la pression atmosphérique doit être faite afin de parfaire le modèle.

## 5.2 RECOMMANDATIONS

Les principales recommandations à la suite de cette étude sont :

- L'élaboration d'un modèle mathématique pour la cohésion de la glace en cisaillement et en tension utilisé avec le modèle d'adhésion présenté dans ce rapport qui permettrait d'obtenir une courbe de contrainte critique en fonction de la température pour la glace atmosphérique en fonction des conditions de croissances sur un substrat.
- Pour une pale tournante, l'utilisation d'un logiciel de simulation d'accrétion de glace telle que le LEWICE ou autre permettrait d'avoir accès à une meilleure approximation de l'aire de la partie cohésive et de la partie adhésive que l'approximation du losange utilisé et améliorerait alors les prévisions du modèle.
- Effectuer des mesures expérimentales de l'adhésion en fonction de la variation de l'humidité relative de l'air qui permettraient d'améliorer le modèle d'adhésion en apportant une correction sur l'épaisseur de la couche semi-liquide à l'interface. En effet, la variation de l'humidité relative agit directement sur la couche semi-liquide en influençant l'évaporation de cette couche et donc l'épaisseur. La pression atmosphérique doit également être ajoutée à l'équation de par son influence sur la pression d'évaporation de cette même couche amorphe. L'ajout d'un hygromètre à l'intérieur de la soufflerie réfrigérée et à l'intérieur des chambres climatiques permettraient de vérifier l'impact de l'humidité relative sur les contraintes de cisaillement expérimentales et de faire ressortir l'impact de cette variation sur l'adhésion.

- Effectuer des mesures expérimentales du temps de nucléation d'une gouttelette d'eau surfondue en fonction des conditions expérimentales (température, vitesse d'impact des gouttelettes, dimension des gouttelettes, pourcentage d'humidité relative, pression de l'air, vitesse d'écoulement de l'air) et des caractéristiques du substrat (rugosité moyenne, distance moyenne entre les aspérités de surface, conductivité thermique, angle de contact). Ces mesures doivent être effectuées afin de valider les valeurs de temps de nucléation obtenues par ajustement de la courbe prévisionnelle sur les données expérimentales.
- Modéliser le temps de nucléation par une simulation numérique afin d'obtenir cette informations sans avoir à effectuer de mesures expérimentales.
- Effectuer une mesure de l'humidité relative et de la pression atmosphérique lors du givrage afin d'avoir le maximum d'informations sur ces conditions et d'ainsi améliorer la justesse de la prévision du modèle d'adhésion en prenant compte de ces paramètres.

## **CHAPITRE 6**

### **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## 6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Krupnik, I., et al., *Siku: Knowing Our Ice: Documenting Inuit Sea Ice Knowledge and Use*. 2010: Springer.
2. Radio-Canada, *Crise du verglas*. <http://www.radio-canada.ca/nouvelles/societe/2009/12/16/013-RDI-15-crise-verglas.shtml>, 1998.
3. Québec, S.p., *Approche et principes en sécurité civile*. 2009.
4. <http://avionique.free.fr/spip.php?article254>, *Dégivrage des avions*. 2012.
5. Andrews, E.H. and N.A. Lockington, *The cohesive and adhesive strength of ice*. Journal of Materials Science, 1983. **18**(5): p. 1455-1465.
6. Jellinek, H.H.G., *Ice Adhesion*. Revue Canadienne de Physique, 1962. **40**(10): p. 1294-1309.
7. Jellinek, H.H.G., *Liquid-like (transition) layer on ice*. Journal of Colloid and Interface Science, 1967. **25**(2): p. 192-205.
8. Hori, T., *Translation 62*. U. S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, 1956.
9. Petrenko, V.F. and S. Peng, *Reduction of ice adhesion to metal by using self-assembling monolayers (SAMs)*. Canadian Journal of Physics, 2003. **81**(1-2): p. 387-393.
10. Faraday, M., *Note on Regelation*. Proceedings of the Royal Society of London, 1859. **10**(ArticleType: research-article / Full publication date: 1859 - 1860 /): p. 440-450.
11. Rosenberg, R., *Why Is Ice Slippery?* Physics Today, 2005. **58**(12): p. 50-55.
12. Hosler, C.L., D.C. Jensen, and L. Goldshlak, *On The Aggregation of Ice Crystals to Form Snow*. Journal of Meteorology, 1957. **14**(5): p. 415-420.
13. Hindmarsh, J.P., et al., *Rapid measurement of dispersion and velocity in freezing drops using magnetic resonance methods*. Experiments in Fluids, 2005. **38**(6): p. 750-758.
14. Macklin, W.C., et al., *The Density and Structure of Ice Formed by Accretion*. 1960: Defense Technical Information Center.
15. Bauerecker, S., et al., *Monitoring Ice Nucleation in Pure and Salty Water via High-Speed Imaging and Computer Simulations*. The Journal of Physical Chemistry C, 2008. **112**(20): p. 7631-7636.
16. Jung, S., et al., *Mechanism of supercooled droplet freezing on surfaces*. Nat Commun, 2012. **3**: p. 615.
17. Yang, G., K. Guo, and N. Li, *Freezing mechanism of supercooled water droplet impinging on metal surfaces*. International Journal of Refrigeration, 2011. **34**(8): p. 2007-2017.
18. Macklin, W.C. and G.S. Payne, *The spreading of accreted droplets*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1969. **95**(406): p. 724-730.

19. Gouez, G., *Évaluation de l'adhérence de la glace à partir du modèle réduit d'une pale d'hélicoptère en rotation*, in DSA2010, Université du Québec à Chicoutimi: Chicoutimi. p. 243.
20. Fortin, G. and J. Perron, *Icing wind tunnel test with spinning rotor blades*. Anti-icing Materials International Laboratory, 2008.
21. Fortin, G. and J. Perron, *Ice Adhesion Models to Predict Shear Stress at Shedding*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(4-5): p. 523-553.
22. Deutschman, A.D., W.J. Michels, and C.E. Wilson, *Machine design; theory and practice*. 1975: Macmillan.
23. Makkonen, L., *Surface Melting of Ice*. The Journal of Physical Chemistry B, 1997. **101**(32): p. 6196-6200.
24. Hacker, P.T. and U.S.N.A.C.f. Aeronautics, *Experimental Values of the Surface Tension of Supercooled Water*. 1951: National Advisory Committee for Aeronautics.
25. Döppenschmidt, A. and H.-J. Butt, *Measuring the Thickness of the Liquid-like Layer on Ice Surfaces with Atomic Force Microscopy*. Langmuir, 2000. **16**(16): p. 6709-6714.
26. Dosch, H., A. Lied, and J.H. Bilgram, *Glancing-angle X-ray scattering studies of the premelting of ice surfaces*. Surface Science, 1995. **327**(1-2): p. 145-164.
27. Kouchi, A., Y. Furukawa, and T. Kuroda, *X-ray diffraction pattern of quasi-liquid layer on ice crystal surface*. J. Phys. Colloques, 1987. **48**(C1): p. C1-675-C1-677.
28. Laforte, C., *Icephobic Material Centrifuge Adhesion Test*. IWAIS XI, UQAC, 2005.
29. Makkonen, L., *Ice Adhesion —Theory, Measurements and Countermeasures*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(4-5): p. 413-445.
30. Laforte, J.-L. and M. Allaire, *Évaluation du givromètre d'Hydro-Québec à différentes intensités de givrage sec et humide*. 1992.
31. Çengel, Y.A. and A.J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*. 2011: McGraw-Hill Companies.
32. SAE, *Calibration and acceptance of icing wind tunnels*. Society of Automotive Engineers, 2003. **Aerospace Recommended Practice** (Rep. ARP-5905): p. 65

## **ANNEXES**



## ANNEXE A

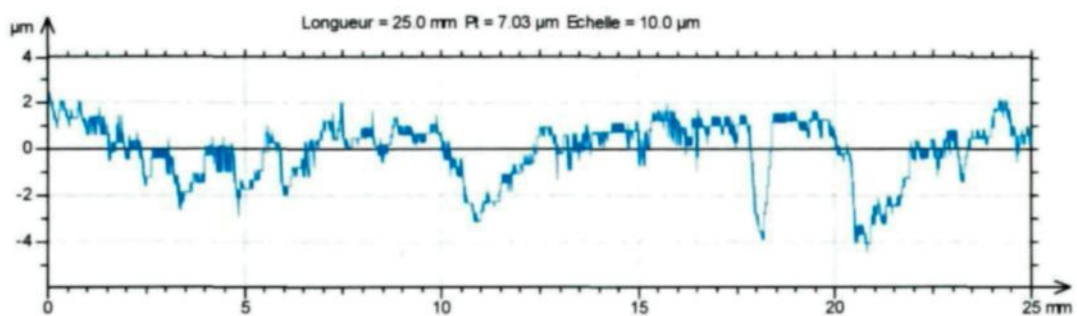
### A.1 Mesures de surface

Cette partie présente les résultats des mesures de surfaces effectuées sur les substrats utilisés avec le CAT et le SRB. L'appareil utilisé est le Surtronic 25 de la compagnie Taylor-Hobson et le logiciel TalyProfile Silver.



Pour chacun des substrats, la mesure est effectuée dans trois axes différents du substrat et la moyenne est utilisée dans les calculs.

#### A.1.1 Aluminium 6061-T6 (CAT)



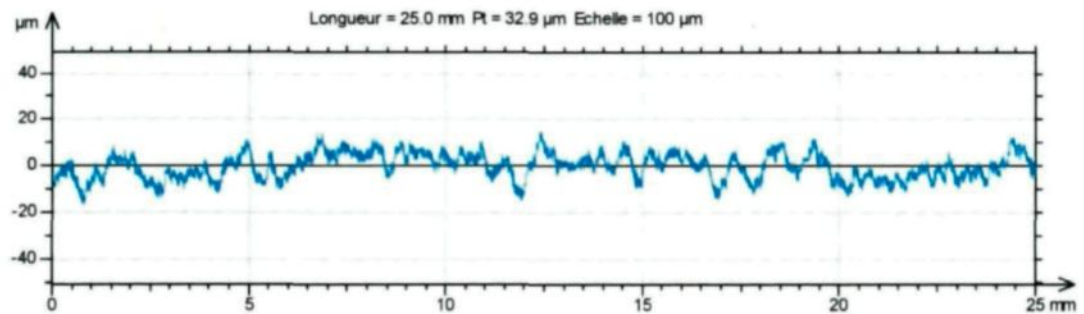
Rugosité moyenne :

$$R_a = 0,793 \mu\text{m}$$

Espacement moyen entre les rugosités :

$$R_{sm} = 0,102 \text{ mm}$$

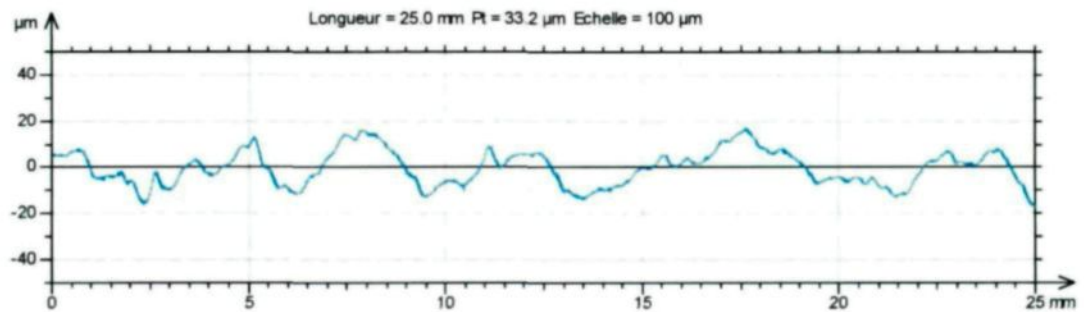
### A.1.2 Aluminium Gravé (CAT)



Rugosité moyenne :  $R_a = 2,04 \mu\text{m}$

Espacement moyen entre les rugosités :  $R_{sm} = 0,110 \text{ mm}$

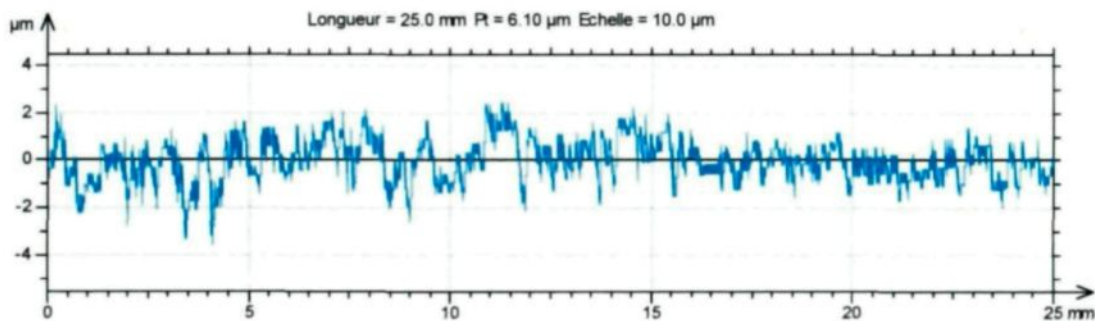
### A.1.3 Wearlon® (CAT)



Rugosité moyenne :  $R_a = 0,759 \mu\text{m}$

Espacement moyen entre les rugosités :  $R_{sm} = 0,509 \text{ mm}$

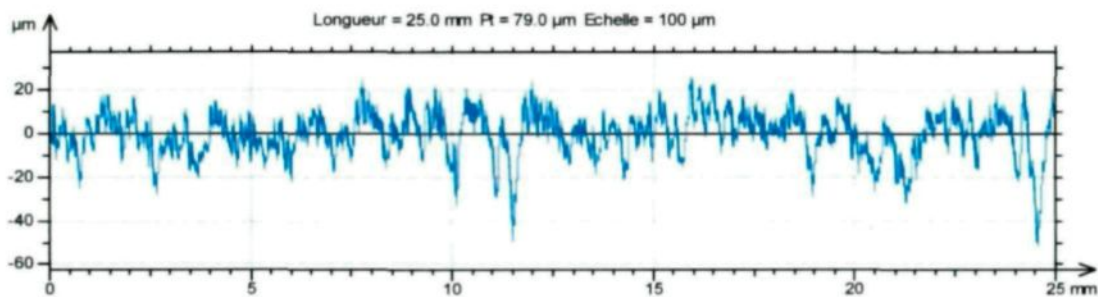
#### A.1.4 Aluminium 6063-T6 (SRB)



Rugosité moyenne :  $R_a = 0,512 \mu\text{m}$

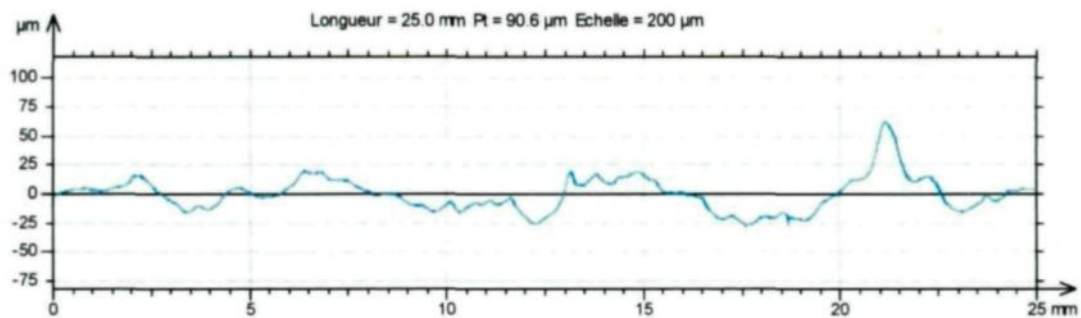
Espacement moyen entre les rugosités :  $R_{sm} = 0,0709 \text{ mm}$

#### A.1.5 Aluminium Gravé (SRB)



Rugosité moyenne :  $R_a = 5,25 \mu\text{m}$

Espacement moyen entre les rugosités :  $R_{sm} = 0,154 \text{ mm}$

**A.1.6 Wearlon® (SRB)**

Rugosité moyenne :

$$R_a = 1,16 \mu\text{m}$$

Espacement moyen entre les rugosités :

$$R_{sm} = 0,603 \text{ mm}$$

## ANNEXE B

### B.1 Description de la chambre climatique pour les essais avec le CAT

Dans cette chambre climatique à température contrôlée, les précipitations givrantes, consistant en une bruine verglaçante, sont produites par un gicleur hydraulique dans lequel est envoyée de l'eau sous pression à une température de 4 °C. Les poutres de différent substrat sont situées sous le gicleur et celui-ci effectue un balayage afin de rendre la précipitation uniforme sur l'ensemble des poutres d'essais. La Figure 45 montre la dimension des poutres d'essais. La Figure 46 montre le gicleur servant à la précipitation, la Figure 47 montre les poutres sur le support permettant l'accrétion de la glace sur celles-ci et la Figure 48 montre l'accrétion de glace résultante sur des poutres d'essai en aluminium.

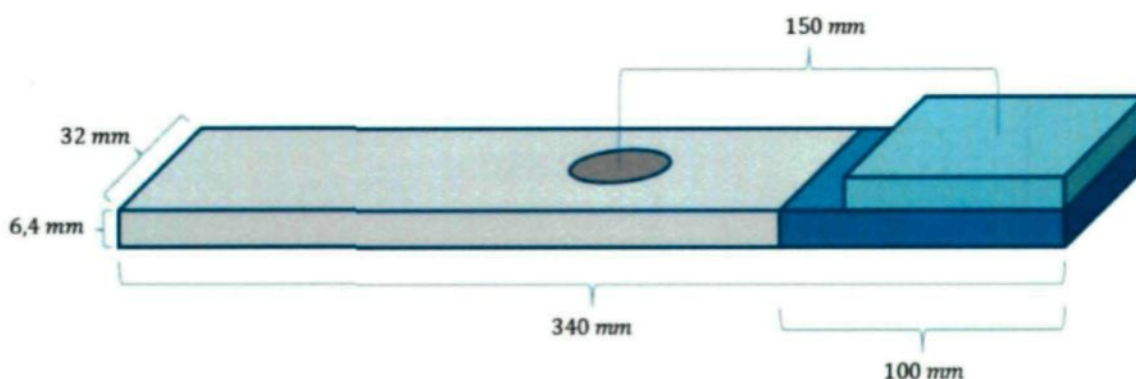


Figure 45 : Dimensions des poutres d'essai pour le CAT

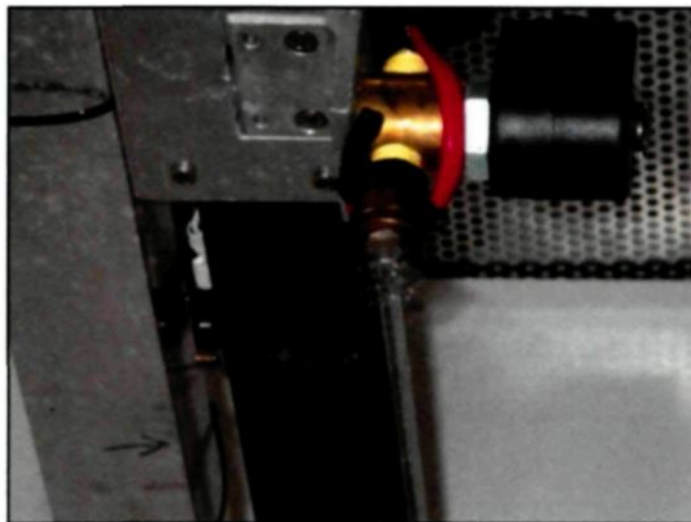


Figure 46 : Gicleur hydraulique utilisé pour la précipitation givrante en chambre climatique de 4 mètres

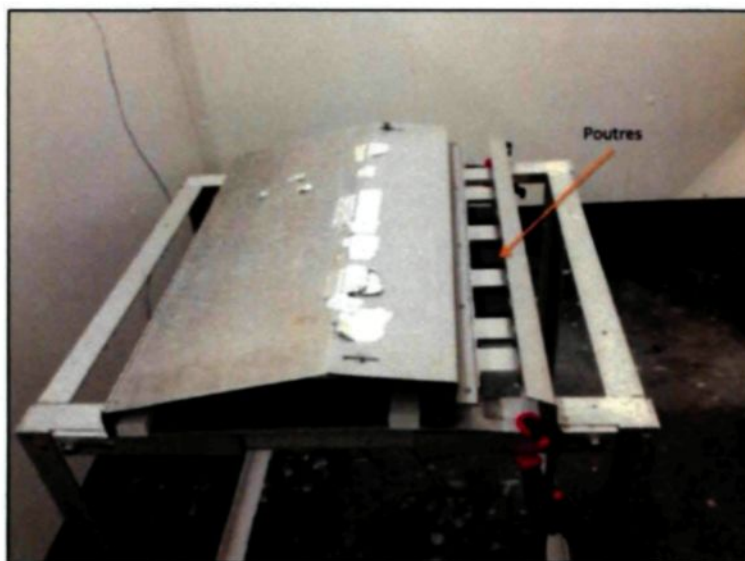


Figure 47 : Poutres d'essais sur le support avant le début des précipitations givrantes en chambre climatique



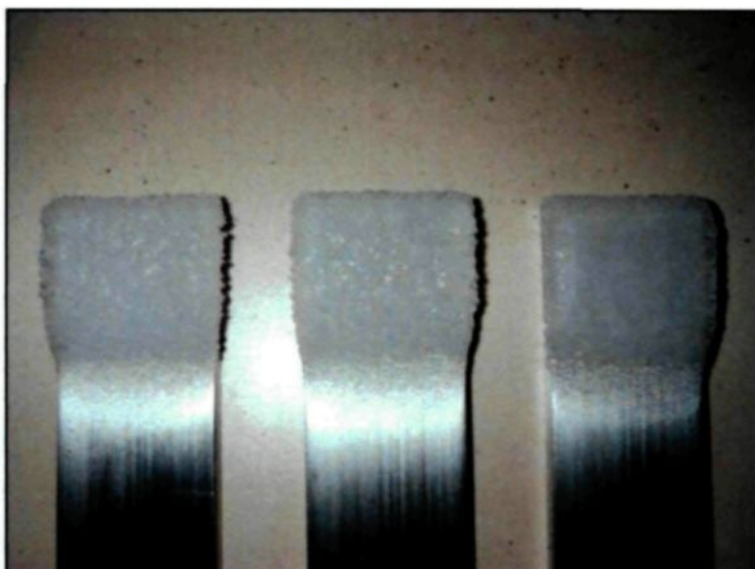


Figure 48 : Accrétion de glace sur des poutres d'aluminium pour les essais de CAT

La Figure 49 montre le résultat des mesures effectuées pour le calcul du diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau dans la chambre climatique.

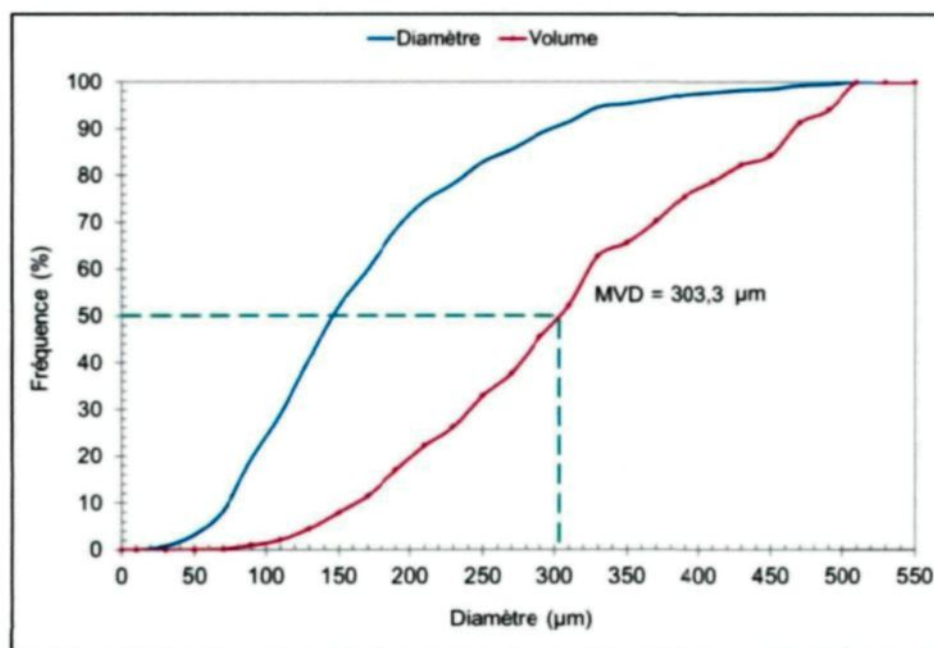


Figure 49 : Diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau dans la chambre climatique

## B.2 Description du Centrifuge Adhesion Test (CAT)

La Figure 50 montre le montage permettant d'effectuer le test d'adhésion de la glace accrétée sur une poutre dans la chambre climatique de 4 mètres. Afin de mesurer la force d'adhésion d'un échantillon de glace accrétée sur une poutre d'essai, on installe la poutre sur cet appareil et la vitesse de rotation nécessaire au détachement de l'échantillon de glace permet de déterminer la contrainte de cisaillement critique.

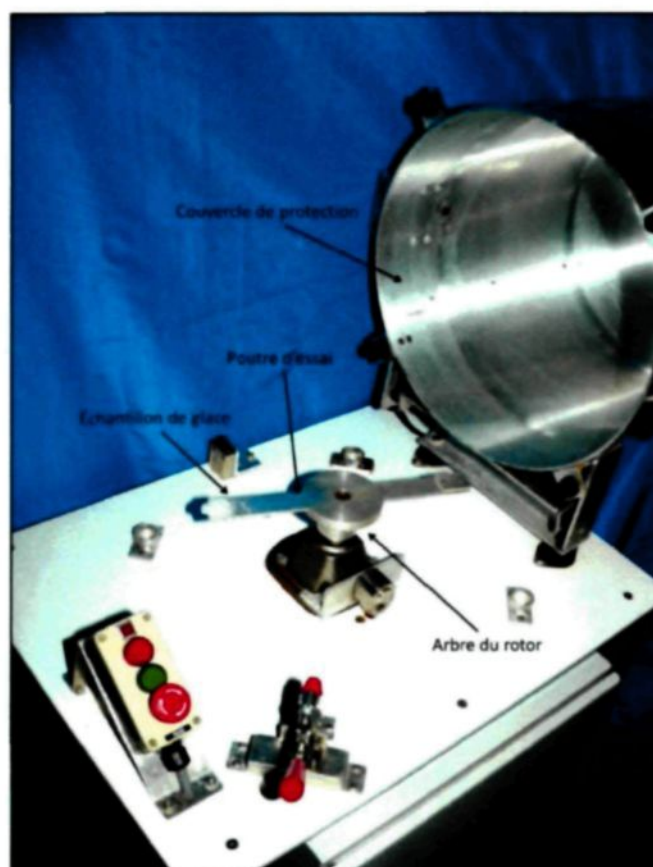


Figure 50 : Montage CAT



### **B.3 Description d'un essai avec le CAT en chambre climatique**

#### **1. Préparation**

- a. Ajuster la chambre à la température de précipitation voulue
- b. Mettre en marche les deux ventilateurs de la chambre à 60 Hz
- c. Peser les poutres à évaluer
- d. Installer le support dans la chambre climatique
- e. Installer les poutres et le thermocouple
- f. Attendre que les poutres atteignent la température de la chambre

#### **2. Essai de givrage**

- a. Fermer le ventilateur #2
- b. Créer le fichier d'essai sur le contrôle de la chambre
- c. Brancher le tuyau d'eau sur le réfrigérateur
- d. Brancher la pression d'air et l'ajuster à 70 psi
- e. Démarrer l'acquisition de la température
- f. Ouvrir la valve d'eau
- g. Démarrer le déplacement du gicleur en même temps que le chronomètre
- h. Attendre l'atteinte de la masse de glace voulue
- i. Fermer la valve d'eau du réfrigérateur
- j. Arrêter le déplacement du gicleur à la fin de sa course
- k. Arrêter l'acquisition de la température et noter la température de l'air des poutres
- l. Modifier la température du contrôle à -10 °C
- m. Démarrer le ventilateur #2 à 60 Hz
- n. Enlever la pression d'air du réfrigérateur
- o. Couvrir les poutres avec le panneau de styrofoam
- p. Brancher le tuyau d'eau du gicleur sur la pression afin de le vider
- q. Enlever le panneau de styrofoam
- r. Remplir le réfrigérateur d'eau

### 3. *Essai de CAT*

- a. Fermer les ventilateurs de la chambre
- b. Peser les poutres, mesurer la glace et prendre les photos
- c. Redémarrer les ventilateurs
- d. Faire les essais de CAT
- e. Fermer les ventilateurs
- f. Peser les poutres, mesurer la glace restante et prendre les photos
- g. Redémarrer les ventilateurs
- h. Arrêter le contrôle de la température
- i. Sortir le support pour le dégivrage
- j. Sortir les poutres et les laisser réchauffer 30 minutes
- k. Laver les poutres d'aluminium seulement

## **B.4 Mesures expérimentales brutes (CAT)**

### **B.4.1 Première série d'essais**

La première série consiste en une température d'accrétion de  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  et des températures de délestage de  $-5$ ,  $-8$ ,  $-10$ ,  $-15$  et  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

# LIMA AMIL

Centrifuge Adhesion TEST SHEET  
Cold Room Icing (Two Candidates)

FOR-ENI059

Reference Substrate (#): Aluminum  
Candidate Coating 1 (#): Attaqué acide  
Candidate Coating 2 (#): wearlon super F1 ice  
Report #: ENV414  
Icing File: CATZL489  
T<sub>air</sub> icing (°C): -8,0 ± 0,0  
T<sub>water</sub> (°C): 4,0 ± 0,5  
T<sub>ice formation</sub> (°C):  
T<sub>air testing</sub> (°C): -5  
Photo #:  
Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-03-22  
Nozzle #: 11001  
Air pressure (psi): 70  
Icing finished at (hr:mm): 9h45  
Spinning started at (hr:mm): 11h20  
Icing time (min): 31  
Time between icing and spinning (hr:min): 1h40  
CAT(ZL or SS) #: CATZL489  
Time OFF (sec): 2,5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000

Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning										Corrected Values after spinning					
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + Ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)	Beam + ice Weight (± 0.01g)	Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925	36,0	32,0	1152	6,4	12,6	6,2	187,25	192,84	5,59	0,1520	36,5	1168	0,1518	187,39	5,45
A926	35,7	32,0	1142	6,4	13,4	7,0	186,76	192,28	5,52	0,1522	34,6	1107	0,1527	186,91	5,37
A928	35,2	32,0	1126	6,4	13,2	6,8	187,37	192,89	5,52	0,1524	35,0	1120	0,1525	187,46	5,43
B118	36,1	32,0	1155	6,0	12,4	6,4	176,10	181,81	5,71	0,1520	37,7	1208	0,1512	176,22	5,59
B119	34,7	32,0	1110	6,1	13,0	6,9	180,99	186,58	5,59	0,1527	36,0	1152	0,1520	181,06	5,52
B120	34,0	32,0	1088	6,1	12,9	6,8	180,60	185,98	5,38	0,1530	35,8	1148	0,1521	180,87	5,31
B123	36,7	32,0	1142	6,6	13,4	6,8	189,12	194,75	5,63	0,1524	36,7	1174	0,1517	189,22	5,53
B124	34,5	32,0	1107	6,6	14,0	7,4	187,86	193,34	5,48	0,1527	35,3	1130	0,1524	187,96	5,38
B125	35,2	32,0	1126	6,6	13,5	6,9	187,88	193,26	5,38	0,1524	35,3	1130	0,1524	187,95	5,31
Average			1128	Average		6,8	Average		5,53		1148	0,1521	Average		5,43
Standard deviation			23	Standard deviation		0,3	Standard deviation		0,11		31	0,0005	Std dev.		0,10
% Variation			2	% Variation		5	% Variation		2		3	0,3179	% Variation		2

Ice Adhesion								
	Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Detachment				Comments	
			Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)		
Aluminum	A925CATZL489		26	7709	539	0.461		
	A926CATZL489		27	7923	564	0.510		
	A928CATZL489		24	7190	469	0.419		
	Average Coating	#DIV/0!	25	7607	524	0.463		
	Standard deviation	#DIV/0!	1	377	49	0.045		
	% Variation	#DIV/0!	5%	5%	9%	10%		
Attaqué acide	B118CATZL489		28	8488	668	0.553		
	B119CATZL489		27	8095	599	0.519		
	B120CATZL489		28	8222	599	0.523		
	Average Coating #1	#DIV/0!	28	8258	622	0.532		
	Standard deviation	#DIV/0!	1	214	40	0.019		
	% Variation	#DIV/0!	3%	3%	6%	4%		

☒ Photo after icing  
☒ Photo after spinning

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 0,9

wearlon super F1 ice		B123CATZL489		12	3636	122	0,104				
		B124CATZL489		13	3902	137	0,121				
		B125CATZL489		11	3419	104	0,092				
		Average Coating #2	#DIV/0!	12	3652	121	0,106				
		Standard deviation	#DIV/0!	1	242	17	0,015				
		% Variation	#DIV/0!	7%	7%	14%	14%				

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 4,4

## Comments:

- The ice sample did not detach completely
- Rejected by Qtest (95% of confidence)
- The sample was accidentally broken before spinning
- Malfunction of the apparatus
- This test was rejected because the mode of detachment consisting of a cohesive and adhesive failure.
- The ice sample detached completely but in two pieces, one piece at ice detachment and the second during the deceleration
- The ice sample did not detach

Testing ☒ Conforme ☐ Non-Conforme

# LIMA AMIL

Centrifuge Adhesion TEST SHEET  
Cold Room Icing (Two Candidates)

FOR-ENI059

Reference Substrate (#): Aluminum  
Candidate Coating 1 (#): attaqué acide  
Candidate Coating 2 (#): Wealon Super F1-ice  
Report #: ENV414  
Icing File: CATZL519  
T<sub>air icing</sub> (°C): -8,1 ± 0,0  
T<sub>water</sub> (°C): 4  
T<sub>ice formation</sub> (°C): -4,9 ± 1,7  
T<sub>air testing</sub> (°C): -8  
Photo #:   
Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-10-02  
Nozzle #: 11001  
Air pressure (psi): 70  
Icing finished at (hr:mm): 13h30  
Spinning started at (hr:mm): 14h45  
Icing time (min): 34  
Time between icing and spinning (hr:min): 1h15  
CAT(ZL or SS) #: CATZL519  
Time OFF (sec): 2,5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000 Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning										Corrected Values after spinning					
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)	Beam + ice Mass (± 0.01g)	Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925	36,3	32,0	1162	6,4	12,8	6,4	187,38	193,14	5,76	0,1519	33,5	1072	0,1533	187,62	5,52
A926	36,9	32,0	1149	6,4	13,1	6,7	186,79	192,35	5,56	0,1521	35,6	1139	0,1522	186,92	5,43
A928	36,0	32,0	1120	6,4	13,0	6,6	187,36	192,64	5,48	0,1525	33,5	1072	0,1533	187,54	5,30
B118	37,0	32,0	1184	6,0	12,5	6,5	176,11	181,79	5,68	0,1515	34,9	1117	0,1526	176,26	5,51
B119	36,0	32,0	1162	6,1	12,8	6,7	181,00	186,56	5,55	0,1520	34,0	1088	0,1530	181,09	5,46
B120	34,6	32,0	1104	6,1	12,9	6,8	180,61	186,00	5,39	0,1528	34,0	1088	0,1530	180,7	5,30
B123	36,3	32,0	1162	6,6	13,0	6,4	189,13	194,61	5,68	0,1519	36,0	1152	0,1520	189,24	5,57
B124	36,0	32,0	1162	6,6	13,2	6,6	187,87	193,40	5,53	0,1520	36,0	1152	0,1520	187,97	5,43
B125	36,0	32,0	1162	6,6	13,2	6,6	187,87	193,49	5,62	0,1520	37,0	1184	0,1515	187,97	5,52
Average			1148	Average		6,6	Average		5,58			1118	0,1525	Average	5,45
Standard deviation			24	Standard deviation		0,1	Standard deviation		0,11			41	0,0006	Std dev.	0,10
% Variation			2	% Variation		2	% Variation		2			4	0,4153	% Variation	2

Ice Adhesion			Detachment				
	Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)	Comments
Aluminum	A925CATZL519	300	28	8284	637	0,594	1
	A926CATZL519	299	29	8815	704	0,618	1
	A928CATZL519	300	27	8116	587	0,547	1
	Average Coating	300	28	8405	643	0,586	
	Standard deviation	0	1	365	59	0,036	
	% Variation	0%	4%	4%	9%	6%	
ataqué acide	B118CATZL519	299	31	9257	790	0,707	
	B119CATZL519	299	31	9427	814	0,746	
	B120CATZL519	299	31	9205	753	0,693	1
	Average Coating #1	299	31	9298	786	0,718	
	Standard deviation	0	0	116	31	0,029	
	% Variation	0%	1%	1%	4%	4%	

Adhesion Reduction Factor ± 0,2= 0,8

Wealon Super F1-ice	B123CATZL519	301	22	6623	407	0,354	
	B124CATZL519	301	22	6516	384	0,334	
	B125CATZL519	302	19	5673	295	0,249	1
	Average Coating #2	200	21	6271	362	0,312	
	Standard deviation	173	2	529	59	0,055	
	% Variation	87%	8%	8%	18%	18%	

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 1,9

## Comments:

- 1 The ice sample did not detach completely
- 2 Rejected by Qtest (95% of confidence)
- 3 The sample was accidentally broken before spinning
- 4 Malfunction of the apparatus
- 5 The mode of detachment consisting of a cohesive and adhesive failure.
- 6 The ice sample detached during the deceleration
- 7 The ice sample did not detach

Testing  
☒ Conforme ☐ Non-Conforme

- ☒ Photo after icing  
☒ Photo after spinning

0,538  
0,182  
34%

# **LIMA AMIL** Centrifuge Adhesion TEST SHEET Cold Room Icing (Two Candidates)

FOR-ENI059

Reference Substrate (#): Aluminum  
Candidate Coating 1 (#): Attaqué acide  
Candidate Coating 2 (#): wearion super F1 ice  
Report #: ENV414  
Icing File: CATZL487  
T<sub>air icing</sub> (°C): -8,0 ± 0,1  
T<sub>water</sub> (°C): 4,0 ± 0,5  
T<sub>ice formation</sub> (°C): -4,6 ± 1,7  
T<sub>air testing</sub> (°C): -10  
Photo #:   
Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-03-20  
Nozzle #: 11001  
Air pressure (psi): 70  
Icing finished at (hr:mm): 11h50  
Spinning started at (hr:mm): 13h15  
Icing time (min): 31  
Time between icing and spinning (hr:min): 1h20  
CAT(ZL or SS) #: CATZL487  
Time OFF (sec): 2,5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000

Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning											Corrected Values after spinning				
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + Ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)	Beam + Ice Weight (± 0.01g)	Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + Ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925	35,7	32,0	1142	6,4	12,7	6,3	187,56	192,99	5,43	0,1522	33,4	1069	0,1533	187,68	5,31
A926	35,0	32,0	1120	6,4	13,8	7,4	186,79	192,16	5,37	0,1525	32,5	1040	0,1538	186,91	5,25
A928	34,5	32,0	1104	6,4	13,3	6,9	187,37	192,78	5,41	0,1528	33,3	1066	0,1534	187,46	5,32
B118	36,5	32,0	1168	6,0	12,4	6,4	178,10	181,58	5,48	0,1518	32,7	1046	0,1537	176,27	5,31
B119	34,4	32,0	1101	6,1	13,0	6,9	180,99	186,36	5,37	0,1528	32,0	1024	0,1540	181,11	5,25
B120	33,7	32,0	1078	6,1	13,0	6,9	180,60	186,00	5,40	0,1532	27,0	854	0,1565	181,13	4,87
B123	35,7	32,0	1142	6,8	13,4	6,8	189,13	194,64	5,51	0,1522	37,0	1184	0,1515	189,19	5,45
B124	35,3	32,0	1130	6,6	14,0	7,4	187,87	193,20	5,33	0,1524	36,5	1168	0,1518	187,91	5,29
B125	35,2	32,0	1126	6,8	13,3	6,7	187,88	193,52	5,64	0,1524	36,5	1168	0,1518	187,91	5,61
Average			1124		Average	6,9		Average	5,44					1070	0,1533
Standard deviation			27		Standard deviation	0,4		Standard deviation	0,09					99	0,0015
% Variation			2		% Variation	6		% Variation	2					9	1,0080

Ice Adhesion		Detachment					
	Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)	Comments
Aluminum	A925CATZL487	297	28	8191	599	0,560	
	A926CATZL487	296	31	8072	728	0,700	
	A928CATZL487	296	30	8795	692	0,549	1
	Average Coating	296	29	8696	673	0,637	
	Standard deviation	0	2	451	67	0,071	
	% Variation	0%	5%	5%	10%	11%	
Attaqué acide	B118CATZL487	296	32	9470	802	0,767	
	B119CATZL487	296	33	9636	823	0,804	1
	B120CATZL487	296	32	9558	764	0,884	1
	Average Coating #1	296	32	9555	795	0,818	
	Standard deviation	0	0	83	30	0,060	
	% Variation	0%	1%	1%	4%	7%	

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 0,8

wearion super F1 ice	B123CATZL487	300	14	4270	165	0,139	
	B124CATZL487	300	13	4059	146	0,125	
	B125CATZL487	301	12	3579	120	0,102	
	Average Coating #2	197	13	3973	143	0,122	
	Standard deviation	171	1	356	23	0,019	
	% Variation	86%	9%	9%	16%	15%	

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 5,2

Comments:  
1 The ice sample did not detach completely  
2 Rejected by Qtest (95% of confidence)  
3 The sample was accidentally broken before spinning

Testing  
☒ Conforms ☐ Non-Conforms

# LIMA AMIL

## Centrifuge Adhesion TEST SHEET Cold Room Icing (Two Candidates)

FOR-ENI059

Reference Substrate (#): Aluminum  
 Candidate Coating 1 (#): Attaqué acide  
 Candidate Coating 2 (#): wearlon super F1 ice  
 Report #: ENV414  
 Icing File: CATZL488  
 T<sub>air icing</sub> (°C): -8,0 ± 0,0  
 T<sub>water</sub> (°C): 4,0 ± 0,5  
 T<sub>ice formation</sub> (°C): -4,2 ± 1,9  
 T<sub>air testing</sub> (°C): -15  
 Photo #:  
 Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-03-21  
 Nozzle #: 11001  
 Air pressure (psi): 70  
 Icing finished at (hr:mm): 11h00  
 Spinning started at (hr:mm): 14h00  
 Icing time (min): 31  
 Time between icing and spinning (hr:min): 3h  
 CAT(ZL or SS) #: CATZL488  
 Time OFF (sec): 2,5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000

Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning										Corrected Values after spinning					
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)	Beam + ice Weight (± 0.01g)	Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925		32,0		6,4		-6,4	187,56		-187,56	0,1700			0,1700		
A926	34,5	32,0	1104	6,4	13,1	6,7	186,79	192,20	5,41	0,1528	29,2	934	0,1554	187,12	5,08
A928	35,8	32,0	1146	6,4	13,3	6,9	187,37	192,70	5,33	0,1521			0,1700		192,70
B118	35,8	32,0	1146	6,0	13,1	7,1	176,10	181,38	5,28	0,1521	29,0	928	0,1555	176,59	4,90
B119	36,4	32,0	1133	6,1	12,8	6,7	180,99	189,37	5,38	0,1523	29,0	928	0,1555	181,32	5,05
B120	34,3	32,0	1098	6,1	12,7	6,6	180,60	185,89	5,29	0,1523	30,7	982	0,1547	180,78	5,11
B123	35,3	32,0	1130	6,6	13,3	6,7	189,13	194,52	5,39	0,1524	36,4	1165	0,1518	189,22	5,30
B124	36,1	32,0	1155	6,6	13,3	6,7	187,87	193,23	5,36	0,1520	36,5	1168	0,1518	187,92	5,31
B125	36,4	32,0	1165	6,6	13,2	6,6	187,88	193,31	5,43	0,1518	36,5	1168	0,1518	187,92	5,39
Average			1008			5,3			-16,08				808	0,1574	Average 25,42
Standard deviation			379			4,4			64,31				470	0,0073	Std dev. 62,76
% Variation			38			83			-400				58	4,6668	% Variation 247

Ice Adhesion		Detachment					
	Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Time (sec)				Comments
			Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)		
Aluminum	A925CATZL488	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	3
	A926CATZL488	296	30	8850	678	0,728	1
	A928CATZL488	295	>33	>9455	>795	>0,694	7
	Average Coating	295	30	8850	678	0,721	
	Standard deviation	1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
	% Variation	0%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
Attaqué acide	B118CATZL488	297	26	7625	476	0,513	1-8
	B119CATZL488	296	32	9322	748	0,806	1
	B120CATZL488	297	29	8751	664	0,676	1
	Average Coating #1	297	29	8566	629	0,741	
	Standard deviation	1	3	884	139	0,093	
	% Variation	0%	11%	10%	22%	12%	

☒ Photo after icing

☒ Photo after spinning

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 1,0

wearlon super F1 ice	B123CATZL488	299	17	5252	243	0,209	
	B124CATZL488	299	18	5290	247	0,212	
	B125CATZL488	299	16	4804	207	0,177	
	Average Coating #2	198	17	5115	233	0,199	
	Standard deviation	171	1	270	22	0,019	
	% Variation	86%	5%	5%	10%	10%	

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 3,6

Comments:

- The ice sample did not detach completely
- Rejected by Qtest (95% of confidence)
- The sample was accidentally broken before spinning
- Malfunction of the apparatus
- This test was rejected because the mode of detachment consisting of a cohesive and adhesive failure.
- The ice sample detached completely but in two pieces, one piece at ice detachment and the second during the deceleration

☒ Conforme ☐ Non-Conforme

# LIMA AMIL Centrifuge Adhesion TEST SHEET Gold Room Icing (Two Candidates)

FOR-ENI059

Reference Substrate (#): Aluminum  
Candidate Coating 1 (#): Attaqué acide  
Candidate Coating 2 (#): wearlon super F1 ice  
Report #: ENV414  
Icing File: CATZL490  
T<sub>air icing</sub> (°C): -8.0 ± 0.0  
T<sub>water</sub> (°C):  
T<sub>ice formation</sub> (°C):  
T<sub>air testing</sub> (°C): -20 (-19.3 beams)  
Photo #:  
Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-03-25  
Nozzle #: 11001  
Air pressure (psi): 70  
Icing finished at (hr:mm): 10h45  
Spinning started at (hr:mm): 13h30  
Icing time (min): 31  
Time between icing and spinning (hr:min): 2h45  
CAT(ZL or SS) #: CATZL490  
Time OFF (sec): 2.5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000

Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning										Corrected Values after spinning					
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + Ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)		Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + Ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925	36,2	32,0	1158	6,4	12,7	6,3	187,25	192,69	5,44	0,1519	33,0	1058	0,1535	187,49	5,20
A926	34,0	32,0	1088	6,4	13,1	6,7	186,76	192,08	5,32	0,1530	29,0	928	0,1555	186,98	5,10
A928	34,2	32,0	1094	6,4	13,3	6,9	187,37	192,70	5,33	0,1529	25,3	810	0,1574	187,88	4,82
B118	36,3	32,0	1162	6,0	12,2	6,2	176,10	181,45	5,35	0,1519	32,0	1024	0,1540	176,42	5,03
B119	34,0	32,0	1088	6,1	13,0	6,9	180,89	186,25	5,26	0,1530	26,0	832	0,1570	181,54	4,71
B120	33,2	32,0	1062	6,1	13,1	7,0	180,80	185,91	5,31	0,1534	28,3	842	0,1569	181,00	4,91
B123	35,0	32,0	1120	6,6	13,9	7,3	189,12	194,47	5,35	0,1529	34,0	1088	0,1530	189,19	5,28
B124	34,5	32,0	1104	6,6	13,5	6,9	187,85	193,15	5,29	0,1529	33,0	1056	0,1535	187,95	5,20
B125	34,5	32,0	1104	6,6	13,6	7,0	187,88	193,30	5,42	0,1529	34,5	1104	0,1528	187,91	5,39
Average			1109		Average	6,8	Average	5,34				971	0,1548	Average	5,07
Standard deviation			33		Standard deviation	0,4	Standard deviation	0,06				119	0,0019	Std dev.	0,22
% Variation			3		% Variation	5	% Variation	1				12	1,1973	% Variation	4

Ice Adhesion		Detachment						Comments
	Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)		
Aluminum	A925CATZL490	296	29	8589	646	0,611	1	
	A926CATZL490	294	32	9313	754	0,813	1	
	A928CATZL490	296	31	9096	688	0,850	1	
	Average Coating	295	31	8999	696	0,768		
	Standard deviation	1	1	372	55	0,128		
	% Variation	0%	5%	4%	8%	17%		
Attaqué acide	B118CATZL490	297	26	7616	493	0,481	1-8	
	B119CATZL490	295	31	9230	691	0,830	1	
	B120CATZL490	297	29	8639	630	0,749	1	
	Average Coating #1	296	29	8495	605	0,790		
	Standard deviation	1	3	817	102	0,058		
	% Variation	0%	10%	10%	17%	7%		

☒ Photo after icing

☒ Photo after spinning

Adhesion Reduction Factor ± 0,2= 1,0							
wearlon super F1 ice	B123CATZL490	298	21	6138	334	0,307	
	B124CATZL490	298	20	5896	394	0,288	
	B125CATZL490	299	18	5265	250	0,227	
	Average Coating #2	198	19	5768	296	0,274	
	Standard deviation	170	2	451	42	0,042	
	% Variation	86%	8%	8%	14%	15%	

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 2,8

## Comments:

- 1 The ice sample did not detach completely
- 2 Rejected by Client (95% of confidence)
- 3 The sample was accidentally broken before spinning
- 4 Malfunction of the apparatus
- 5 This test was rejected because the mode of detachment consisting of a cohesive and adhesive failure.
- 6 The ice sample detached completely but in two pieces, one piece at ice detachment and the second during the deceleration
- 7 The ice sample did not detach

Testing ☒ Conforme ☐ Non-Conforme



#### **B.4.2 Deuxième série d'essais**

La deuxième série consiste en une température d'accrétion et de délestage de -5, -10, -13, -15, -20 et -25 °C.

# LIMA AMIL

Centrifuge Adhesion TEST SHEET  
Cold Room Icing (Two Candidates)

FOR-ENI059

Reference Substrate (#): Aluminum  
 Candidate Coating 1 (#): attaqué acide  
 Candidate Coating 2 (#): Wealon Super F1-Ice  
 Report #: ENV414  
 Icing File: CATZL496  
 T<sub>air icing</sub> (°C): -5.0 ± 0.0  
 T<sub>water</sub> (°C):  
 T<sub>ice formation</sub> (°C): -2.0 ± 1.9  
 T<sub>air testing</sub> (°C): -5  
 Photo #:  
 Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-04-18  
 Nozzle #: 11001  
 Air pressure (psi): 70  
 Icing finished at (hr:mm): 9h35  
 Spinning started at (hr:mm): 13h30  
 Icing time (min): 31  
 Time between icing and spinning (hr:min): 4h  
 CAT(ZL or SS) #: CATZL496  
 Time OFF (sec): 2.5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000

Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning										Corrected Values after spinning					
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + Ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)	Beam + Ice Mass (± 0.01g)	Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + Ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925	51,0	32,0	1632	6,4	11,1	4,7	187,31	192,43	5,12	0,1449	51,0	1632	0,1449	187,37	5,06
A926	46,0	32,0	1472	6,4	11,1	4,7	186,78	191,84	5,06	0,1470	46,0	1472	0,1470	189,95	4,89
A928	45,0	32,0	1440	6,4	11,4	5,0	187,37	192,37	5,00	0,1475	45,0	1440	0,1475	187,49	4,88
B118	45,4	32,0	1453	6,0	10,2	4,2	176,11	181,04	4,93	0,1473	45,4	1453	0,1473	176,16	4,88
B119	42,0	32,0	1344	6,1	10,6	4,5	181,01	185,87	4,86	0,1490	42,0	1344	0,1490	181,09	4,78
B120	41,0	32,0	1312	6,1	11,3	5,2	180,61	185,45	4,84	0,1495	41,0	1312	0,1495	180,64	4,81
B123	39,0	32,0	1248	6,6	11,4	4,8	189,13	194,12	4,99	0,1504	34,6	1107	0,1527	189,38	4,74
B124	34,0	32,0	1088	6,6	11,5	4,9	187,87	192,33	4,46	0,1530	33,0	1058	0,1535	188,12	4,21
B125	36,0	32,0	1152	6,6	11,8	5,2	187,88	192,52	4,64	0,1520	34,4	1101	0,1528	188,06	4,46
Average			1349	Average		4,8	Average		4,88		1324	0,1493	Average		4,75
Standard deviation			171	Standard deviation		0,3	Standard deviation		0,21		199	0,0031	Std dev.		0,26
% Variation			13	% Variation		7	% Variation		4		15	2,0798	% Variation		5

		Ice Adhesion			Detachment				
		Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)	Comments	
Aluminum		A925CATZL496	298	26	7889	499	0,306		
		A926CATZL496	298	26	7817	482	0,327		
		A928CATZL496	298	25	7564	452	0,314		
		Average Coating	298	26	7757	477	0,316		
		Standard deviation	0	1	171	24	0,011		
		% Variation	0%	2%	2%	5%	3%		
attaque acide		B118CATZL496	297	31	9222	670	0,461		
		B119CATZL496	297	30	8784	603	0,448		
		B120CATZL496	297	29	8604	584	0,445		
		Average Coating #1	297	30	8870	619	0,452		
		Standard deviation	0	1	318	46	0,009		
		% Variation	0%	4%	4%	7%	2%		

Adhesion Reduction Factor ± 0,2= 0,7

Wealon Super F1-Ice		B123CATZL496	300	17	5143	210	0,190	
		B124CATZL496	299	19	5667	228	0,216	
		B125CATZL496	300	17	5188	201	0,183	
		Average Coating #2	198	18	5333	213	0,196	
		Standard deviation	171	1	290	13	0,017	
		% Variation	86%	5%	5%	6%	9%	

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 1,6

## Comments:

- 1 The ice sample did not detach completely
- 2 Rejected by Qtest (95% of confidence)
- 3 The sample was accidentally broken before spinning
- 4 Malfunction of the apparatus
- 5 The mode of detachment consisting of a cohesive and adhesive failure.
- 6 The ice sample detached during the deceleration
- 7 The ice sample did not detach

## Testing

☒ Conforme ☐ Non-Conforme

☒ Photo after icing

☒ Photo after spinning

0,321  
0,111  
35%

**LIMA AMIL**  
Centrifuge Adhesion TEST SHEET  
Cold Room Icing (Two Candidates)

FOR-EN059

Reference Substrate (#): Aluminum  
Candidate Coating 1 (#): attaqué acide  
Candidate Coating 2 (#): Wealon Super F1-Ice  
Report #: ENV414  
Icing File: CATZL493  
T<sub>air icing</sub> (°C): -10,0 ± 0,0  
T<sub>water</sub> (°C):  
T<sub>ice formation</sub> (°C): -5,8 ± 1,9  
T<sub>air testing</sub> (°C): -10  
Photo #:  
Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-04-15  
Nozzle #: 11001  
Air pressure (psi): 70  
Icing finished at (hr:mm): 12h  
Spinning started at (hr:mm): 14h  
Icing time (min): 31  
Time between icing and spinning (hr:min): 2h  
CAT(ZL or SS) #: CATZL493  
Time OFF (sec): 2,5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000

Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning											Corrected Values after spinning				
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)	Beam + ice Mass (± 0.01g)	Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925	37,7	32,0	1206	6,4	13,1	6,7	187,30	193,06	5,76	0,1512	34,7	1110	0,1527	187,46	5,60
A926	36,7	32,0	1142	6,4	13,9	7,5	186,78	192,85	5,87	0,1522	31,8	1018	0,1541	187,03	5,62
A928	36,0	32,0	1152	6,4	13,9	7,5	187,37	193,00	5,63	0,1520	31,8	1018	0,1541	187,57	5,43
B118	37,5	32,0	1200	6,0	12,7	6,7	176,11	181,78	5,67	0,1513	31,2	998	0,1544	178,41	5,37
B119	36,8	32,0	1146	6,1	13,5	7,4	181,01	186,82	5,81	0,1521	31,2	998	0,1544	181,19	5,63
B120	34,3	32,0	1098	6,1	13,3	7,2	180,61	186,11	5,50	0,1529	33,0	1056	0,1535	180,83	5,28
B123	36,0	32,0	1152	6,6	13,6	7,0	189,13	194,97	5,84	0,1520	36,4	1165	0,1518	189,21	5,76
B124	36,0	32,0	1152	6,6	13,8	7,2	187,87	193,67	5,80	0,1520	34,4	1101	0,1528	187,92	5,75
B125	36,0	32,0	1120	6,6	13,7	7,1	187,88	193,47	5,59	0,1525	34,4	1101	0,1528	187,94	5,53
Average			1152	Average		7,1	Average		5,72			1063	0,1534	Average	5,65
Standard deviation			34	Standard deviation		0,3	Standard deviation		0,13			59	0,0009	Std dev.	0,17
% Variation			3	% Variation		4	% Variation		2			5	0,6026	% Variation	3

Ice Adhesion		Detachment					
	Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)	Comments
Aluminum	A925CATZL493	296	31	9218	797	0,717	1
	A926CATZL493	296	28	8455	679	0,667	1
	A928CATZL493	296	30	9016	746	0,733	1
	Average Coating	296	30	8896	740	0,706	
	Standard deviation	0	1	395	59	0,034	
	% Variation	0%	5%	4%	8%	5%	
attaqué acide	B118CATZL493	296	30	8999	736	0,738	1
	B119CATZL493	297	28	8300	657	0,659	1
	B120CATZL493	296	33	>9645	>827	>0,763	1-6
	Average Coating #1	296	30	8650	697	0,698	
	Standard deviation	1	2	494	56	0,056	
	% Variation	0%	8%	6%	8%	8%	

☒ Photo after icing☒ Photo after spinning

**Adhesion Reduction Factor ± 0,2= 1,0**

Wealon Super F1-Ice	B123CATZL493	299	18	5339	273	0,235
	B124CATZL493	299	18	5427	284	0,268
	B125CATZL493	299	17	5193	250	0,227
	Average Coating #2	197	18	5320	269	0,240
	Standard deviation	170	0	118	17	0,015
	% Variation	86%	2%	2%	6%	7%

0,529

0,241

46%

**Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 2,9**

Testing

☒ Conforme ☐ Non-Conforme

Comments:

- 1 The ice sample did not detach completely
- 2 Rejected by Qtest (95% of confidence)
- 3 The sample was accidentally broken before spinning
- 4 Malfunction of the apparatus
- 5 This test was rejected because the mode of detachment consisting of a cohesive and adhesive failure.
- 6 The ice sample detached during the deceleration
- 7 The ice sample did not detach

Date de révision: 10-07-15

Z:\FGuerin\CAT Adhesion modelling\nouvelle batch\CATZL493\catz493.xlsx

# LIMA AMIL Centrifuge Adhesion TEST SHEET Cold Room Icing (Two Candidates)

FOR-ENI059

Reference Substrate (#): Aluminum  
 Candidate Coating 1 (#): attaqué acide  
 Candidate Coating 2 (#): Wealon Super F1-Ice  
 Report #: ENV414  
 Icing File: CATZL497  
 T<sub>air icing</sub> (°C): -13.0 ± 0.0  
 T<sub>water</sub> (°C): \_\_\_\_\_  
 T<sub>ice formation</sub> (°C): \_\_\_\_\_  
 T<sub>air testing</sub> (°C): -13  
 Photo #: \_\_\_\_\_  
 Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-04-19  
 Nozzle #: 11001  
 Air pressure (psi): 70  
 Icing finished at (hr:mm): 10h  
 Spinning started at (hr:mm): \_\_\_\_\_  
 Icing time (min): 31  
 Time between icing and spinning (hr:min): \_\_\_\_\_  
 CAT(ZL or SS) #: CATZL497  
 Time OFF (sec): 2.5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000

Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning										Corrected Values after spinning					
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + Ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)	Beam + Ice Mass (± 0.01g)	Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + Ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925	37,0	32,0	1184	6,4	14,5	8,1	187,31	193,00	5,69	0,1515	29,4	941	0,1553	187,77	5,23
A926	37,0	32,0	1184	6,4	15,0	8,6	186,78	192,72	5,94	0,1519	31,0	992	0,1545	187,26	5,46
A928	35,7	32,0	1142	6,4	15,0	8,6	187,37	193,28	5,91	0,1522	26,5	848	0,1566	188,15	5,13
B118	37,0	32,0	1184	6,0	14,4	8,4	176,11	181,92	5,81	0,1519	31,9	1021	0,1541	178,41	5,51
B119	36,0	32,0	1152	6,1	14,9	8,8	181,01	186,95	5,94	0,1520	30,0	960	0,1550	181,48	5,47
B120	35,0	32,0	1120	6,1	14,7	8,6	180,61	186,43	5,82	0,1528	29,0	928	0,1555	181,05	5,38
B123	36,5	32,0	1168	6,6	15,0	8,4	189,13	195,07	5,94	0,1518	35,4	999	0,1523	189,73	5,34
B124	36,0	32,0	1152	6,6	15,1	8,5	187,87	193,88	6,01	0,1520	33,0	1056	0,1535	188,12	5,78
B125	35,5	32,0	1146	6,6	15,0	8,4	187,88	193,81	5,93	0,1521	34,8	1114	0,1526	187,95	5,85
Average			1159		Average	8,5		Average	5,89			984	0,1544	Average	5,46
Standard deviation			22		Standard deviation	0,2		Standard deviation	0,10			77	0,0014	Std dev.	0,23
% Variation			2		% Variation	2		% Variation	2			8	0,9300	% Variation	4

Ice Adhesion			Detachment				
	Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)	Comments
Aluminum	A925CATZL497	295	32	9311	772	0,621	1-5
	A926CATZL497	296	29	8569	679	0,635	1-5
	A928CATZL497	297	26	7632	514	0,606	1-5
	Average Coating	296	29	8504	655	0,704	
	Standard deviation	1	3	841	131	0,109	
	% Variation	0%	11%	10%	20%	15%	
attaqué acide	B118CATZL497	296	29	8570	684	0,670	1-5
	B119CATZL497	297	29	8498	671	0,699	1-5
	B120CATZL497	297	29	8525	667	0,718	1-5
	Average Coating #1	296	29	8531	674	0,696	
	Standard deviation	0	0	36	9	0,025	
	% Variation	0%	0%	0%	1%	4%	

☒ Photo after icing  
☒ Photo after spinning

Adhesion Reduction Factor ± 0,2= **1,0**

Wealon Super F1-Ice	B123CATZL497	299	18	5517	271	0,272	1-5
	B124CATZL497	299	18	5281	271	0,257	1-5
	B125CATZL497	299	17	4991	244	0,219	
	Average Coating #2	198	18	5266	262	0,249	
	Standard deviation	171	1	264	16	0,027	
	% Variation	87%	5%	5%	6%	11%	

0,550  
0,232  
42%

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= **2,8**

Comments:

- 1 The ice sample did not detach completely
- 2 Rejected by Qtest (95% of confidence)
- 3 The sample was accidentally broken before spinning
- 4 Malfunction of the apparatus
- 5 The mode of detachment consisting of a cohesive and adhesive failure.
- 6 The ice sample detached during the deceleration
- 7 The ice sample did not detach

Testing  
☒ Conforme ☐ Non-Conforme



**LIMA AMIL**  
Centrifuge Adhesion TEST SHEET  
Gold Room Icing (Two Candidates)

FOR-ENI059

Reference Substrate (#): Aluminum  
Candidate Coating 1 (#): attaqué acide  
Candidate Coating 2 (#): Wealon Super F1-ice  
Report #: ENV414  
Icing File: CATZL498  
T<sub>air icing</sub> (°C): -19.9 ± 0.0  
T<sub>water</sub> (°C): 4  
T<sub>ice formation</sub> (°C): -15.8 ± 1.7  
T<sub>air testing</sub> (°C): -20  
Photo #: \_\_\_\_\_  
Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-04-24  
Nozzle #: 11001  
Air pressure (psi): 70  
Icing finished at (hr:mm): 11h30  
Spinning started at (hr:mm): 14h30  
Icing time (min): 31  
Time between icing and spinning (hr:min): 3h  
CAT(ZL or SS) #: CATZL498  
Time OFF (sec): 2.5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000

Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning										Corrected Values after spinning					
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)	Beam + ice Mass (± 0.01g)	Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925	37.3	32.0	1194	6.4	17.5	11.1	187.31	192.66	5.35	0.1514	22.4	715	0.1588	188.98	3.68
A925	36.0	32.0	1162	6.4	18.4	12.0	186.78	192.45	5.67	0.1520	23.5	752	0.1583	187.99	4.46
A928	36.0	32.0	1162	6.4	19.2	12.8	187.37	193.21	5.84	0.1520	27.0	864	0.1585	188.26	4.95
B118	37.0	32.0	1184	6.0	17.2	11.2	176.11	181.57	5.46	0.1515	29.0	928	0.1555	177.03	4.54
B119	36.0	32.0	1162	6.1	18.5	12.4	181.01	186.76	5.75	0.1520	27.0	864	0.1585	181.57	5.19
B120	35.0	32.0	1120	6.1	18.5	12.4	180.61	186.31	5.70	0.1525	25.5	816	0.1573	181.46	4.85
B123	36.0	32.0	1162	6.6	18.3	11.7	189.13	194.76	5.63	0.1520	27.5	440	0.1563	192.04	2.72
B124	36.5	32.0	1168	6.6	18.6	12.0	187.67	193.65	5.78	0.1518	26.0	832	0.1570	188.98	4.67
B125	35.0	32.0	1120	6.6	19.6	13.0	187.88	193.54	5.66	0.1525	20.0	640	0.1600	189.28	4.28
Average			1165	Average		12.1	Average		5.65		761	0.1573	Average	4.37	
Standard deviation			25	Standard deviation		0.7	Standard deviation		0.16		149	0.0014	Std dev.	0.76	
% Variation			2	% Variation		5	% Variation		3		20	0.9049	% Variation	17	

Ice Adhesion							
	Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Detachment				Comments
			Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)	
Aluminum	A925CATZL498	297	21	6376	261	0.364	1-9
	A926CATZL498	297	19	5731	254	0.338	1-9
	A928CATZL498	297	19	5677	274	0.317	1-9
	Average Coating	297	20	5928	263	0.340	
	Standard deviation	0	1	389	10	0.024	
	% Variation	0%	7%	7%	4%	7%	
attaqué acide	B118CATZL498	297	21	6217	299	0.322	1-9
	B119CATZL498	297	20	6002	321	0.371	1-9
	B120CATZL498	298	19	5600	262	0.321	1-9
	Average Coating #1	297	20	5940	294	0.338	
	Standard deviation	0	1	313	30	0.029	
	% Variation	0%	5%	5%	10%	8%	

☒ Photo after icing  
☒ Photo after spinning

**Adhesion Reduction Factor ± 0,2= 1,0**

B123CATZL498	298	18	5319	132	0.300	1-5
B124CATZL498	297	18	5440	238	0.288	1-5
B125CATZL498	298	17	5131	198	0.309	1-5
Average Coating #2	198	18	5297	189	0.298	
Standard deviation	172	1	156	54	0.012	
% Variation	86%	3%	3%	28%	4%	

0,325  
0,028  
9%

**Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 1,1**

Comments:

- The ice sample did not detach completely
- Rejected by Ctest (95% of confidence)
- The sample was accidentally broken before spinning
- Malfunction of the apparatus
- The mode of detachment consisting of a cohesive and adhesive failure.
- The ice sample detached during the deceleration
- The ice sample did not detach

Testing  
☒ Conforme ☐ Non-Conforme

# LIMA AMIL Centrifuge Adhesion TEST SHEET Cold Room Icing (Two Candidates)

FOR-ENI059

Reference Substrate (#): Aluminum  
Candidate Coating 1 (#): attaqué acide  
Candidate Coating 2 (#): Wealson Super F1-ice  
Report #: ENV414  
Icing File: CATZL499  
T<sub>air icing</sub> (°C): -25.0 ± 0.0  
T<sub>water</sub> (°C): 4  
T<sub>ice formation</sub> (°C): -19  
T<sub>air testing</sub> (°C): -25  
Photo #:   
Centrifuge Operator: Caroline B

Date (yyyy/mm/dd): 2013-04-25  
Nozzle #: 11001  
Air pressure (psi): 70  
Icing finished at (hr:mm): 11h40  
Spinning started at (hr:mm): 14h30  
Icing time (min): 31  
Time between icing and spinning (hr:min): 3h  
CAT(ZL or SS) #: CATZL499  
Time OFF (sec): 2.5

Acceleration (rpm/sec): ☒ 300 ☐ 100 ☐ 600 ☐ 900 Transmission used: ☒ 10 000 ☐ 1 000

Balance Verification: ☒ 200 g

Iced beam properties before spinning										Corrected Values after spinning					
Product and Beam #	Ice length (mm)	Ice width (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	Beam Thickness (mm)	Beam + Ice Thickness (mm)	Ice Thickness (mm)	Beam Weight (± 0.01g)	Beam + Ice Mass (± 0.01g)	Ice Weight (± 0.02g)	R (m)	Ice length (mm)	Surface (mm <sup>2</sup> )	R (m)	Beam + Ice Weight after (g)	Ice Weight (g)
A925	37,0	32,0	1184	6,4	20,0	13,6	187,31	192,81	5,50	0,1515	32,3	517	0,1539	190,02	2,79
A926	35,0	32,0	1120	6,4	20,6	14,2	186,78	192,27	5,49	0,1525	23,5	752	0,1583	188,3	3,97
A928	38,0	32,0	1162	6,4	21,2	14,8	187,37	192,96	5,59	0,1520	27,6	883	0,1562	188,37	4,59
B118	37,0	32,0	1184	6,0	20,0	14,0	176,11	181,73	5,62	0,1515	31,0	992	0,1546	176,79	4,94
B119	36,0	32,0	1162	6,1	20,5	14,4	181,01	186,51	5,50	0,1520	29,6	947	0,1552	181,09	4,52
B120	35,0	32,0	1120	6,1	21,0	14,9	180,61	186,21	5,60	0,1525	28,6	915	0,1557	181,60	4,61
B123	37,0	32,0	1184	6,6	21,1	14,5	189,13	194,76	5,63	0,1515	29,5	944	0,1553	190,39	4,37
B124	36,4	32,0	1165	6,6	21,4	14,8	187,87	193,45	5,58	0,1518	29,0	928	0,1555	188,79	4,66
B125	36,0	32,0	1162	6,6	22,5	15,9	187,88	193,53	5,65	0,1520	23,3	744	0,1584	189,49	4,04
Average			1157		Average	14,5		Average	5,57					Average	4,28
Standard deviation			25		Standard deviation	0,7		Standard deviation	0,06					Std dev.	0,63
% Variation			2		% Variation	4		% Variation	1					% Variation	15

		Ice Adhesion					
		Spin data file name (Product#Beam#CAT#)	Acc. (rpm/sec)	Time (sec)	Speed (RPM)	Force (N)	Bulk Shear Stress (Mpa)
Aluminum		A925CATZL499	298	14	4295	87	0,168
		A926CATZL499	297	15	4601	146	0,194
		A928CATZL499	297	14	4215	140	0,158
		Average Coating	297	15	4370	124	0,173
		Standard deviation	0	1	204	32	0,018
		% Variation	0%	5%	5%	26%	11%
attaqué acide		B118CATZL499	298	15	4410	163	0,164
		B119CATZL499	298	15	4367	147	0,155
		B120CATZL499	297	15	4361	150	0,164
		Average Coating #1	297	15	4379	153	0,161
		Standard deviation	0	0	27	9	0,005
		% Variation	0%	1%	1%	6%	3%

Adhesion Reduction Factor ± 0,2= 1,1

	B123CATZL499	298	15	4403	144	0,153	1-9
	B124CATZL499	298	15	4374	152	0,164	1-9
	B125CATZL499	298	15	4450	139	0,187	1-9
	Average Coating #2	198	15	4409	145	0,168	
	Standard deviation	172	0	38	7	0,017	
	% Variation	87%	1%	1%	5%	10%	

Adhesion Reduction Factor ± 0,1= 1,0

## Comments:

- 1 The ice sample did not detach completely
- 2 Rejected by Qtest (95% of confidence)
- 3 The sample was accidentally broken before spinning
- 4 Malfunction of the apparatus
- 5 The mode of detachment consisting of a cohesive and adhesive failure.
- 6 The ice sample detached during the deceleration
- 7 The ice sample did not detach

Testing  
☒ Conforme ☐ Non-Conforme

☒ Photo after icing  
☒ Photo after spinning

0,167  
0,014  
8%



## ANNEXE C

### C.1 Description de la soufflerie pour les essais avec le SRB

La soufflerie utilisée étant la même que celle utilisée pour les essais faits par Gouez [19], les descriptions suivantes de la soufflerie et du SRB sont tirées de cet ouvrage.

Les essais sont réalisés dans la soufflerie réfrigérée du LIMA schématisée à la Figure 51. Elle fonctionne en boucle fermée et à faible vitesse. La soufflerie peut opérer jusqu'à des températures de  $-25\text{ °C}$  en refroidissant l'air à l'aide d'un échangeur thermique de dimension 1,6 m par 1,6 m. L'échangeur est composé d'un compresseur de 35 HP (26,1 kW) alimentant une pompe puisant dans un réservoir de 205 L de glycol. L'air dans la soufflerie circule grâce à un ventilateur d'un diamètre de 0,927 m actionné par un moteur de 50 HP (37,3 kW) permettant un flux d'air de 31 kg/s dans la section d'essai.

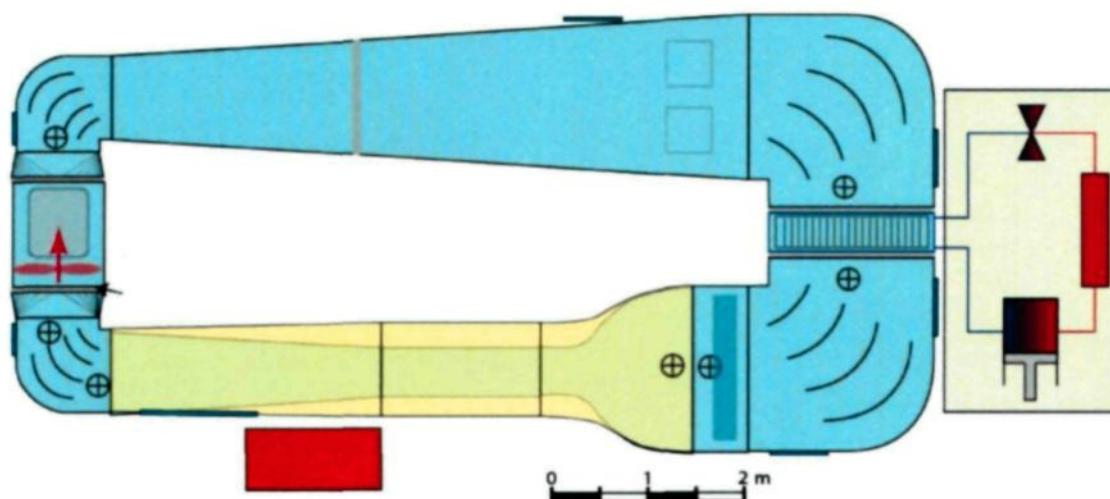


Figure 51 : Représentation schématique de la soufflerie réfrigérée





**Figure 52 : Rampe des gicleurs pneumatiques à balayage vertical de la soufflerie réfrigérée**

La rampe de gicleurs, visible sur la Figure 52 a été conçue au LIMA, elle est composée de neuf gicleurs pneumatiques contrôlés par des débitmètres (Figure 54) Ce montage permet d'atteindre des teneurs en eau liquide de l'écoulement variant de 0,15 à  $28 \text{ g.m}^{-3}$  dont les gouttelettes ont des diamètres moyens variant entre 16 et  $50 \mu\text{m}$ . Afin d'homogénéiser verticalement la teneur en eau dans la section d'essai, la rampe de gicleurs effectue un balayage vertical.

La Figure 53 montre le résultat des mesures effectuées pour le calcul du diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau dans la soufflerie réfrigérée.

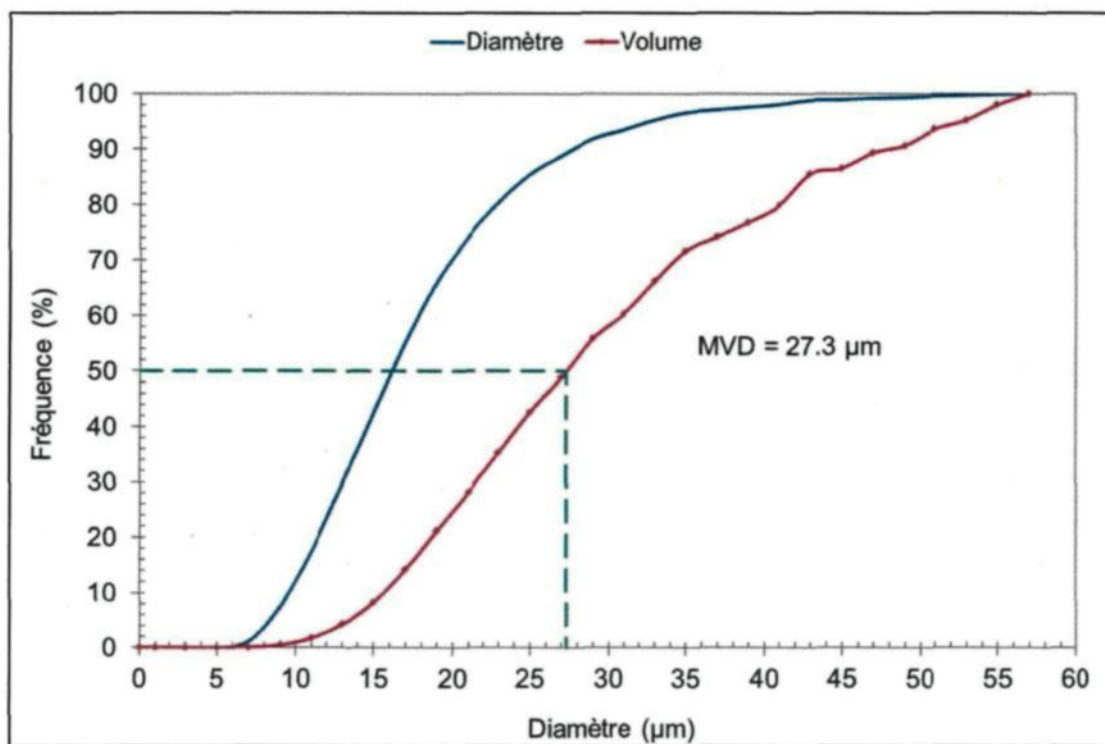


Figure 53 : Diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau dans la soufflerie réfrigérée



Figure 54 : Débitmètres contrôlant les gicleurs de la soufflerie réfrigérée

La section d'essai (Figure 55) a une dimension de 1,7 m x 0,914 m x 0,762 m. Les parois de la section d'essai sont composées de deux couches de Lexan d'une épaisseur de 12,7 mm chacune. Elle est la partie de la soufflerie dans laquelle est installé le SRB. Afin de garantir des résultats cohérents et transposables à des conditions de givrage naturelles, il a été nécessaire d'effectuer de nombreux essais d'étalonnage pour vérifier la répartition de la vitesse, de la température, de la teneur en eau et la taille des gouttelettes. Cette caractérisation a été effectuée dans l'optique d'être habilité à effectuer des essais dans le domaine de l'aéronautique.



Figure 55 : Section d'essais de la soufflerie réfrigérée

Les principaux capteurs de mesure, soient, les thermocouples et les prises de pressions statiques, sont installés dans la section d'essai et à l'entrée du convergent.

La soufflerie a été étalonnée et ajustée pour correspondre aux recommandations du rapport SAE ARP 5905 *Calibration and Acceptance of Icing Wind Tunnels* [32].

## **C.2 Description du Spinning Rotor Blade (SRB)**

Le SRB est un modèle réduit d'un rotor d'hélicoptère. Il est composé d'un moteur, d'un arbre de transmission, d'un moyeu et de deux pales. Le SRB a été développé au LIMA.

### **C.2.1 Le moteur électrique du SRB**

Le moteur électrique développe une puissance de 10 HP pour une vitesse de rotation de 3 600 RPM. Un capteur mesurant l'impulsion à chaque tour a été installé directement sur l'arbre de sortie du moteur afin de déterminer la vitesse de rotation. La consommation énergétique du moteur est mesurée à l'entrée de la commande de puissance, elle permet d'observer l'évolution de la puissance consommée durant le givrage.

### C.2.2 Le rotor

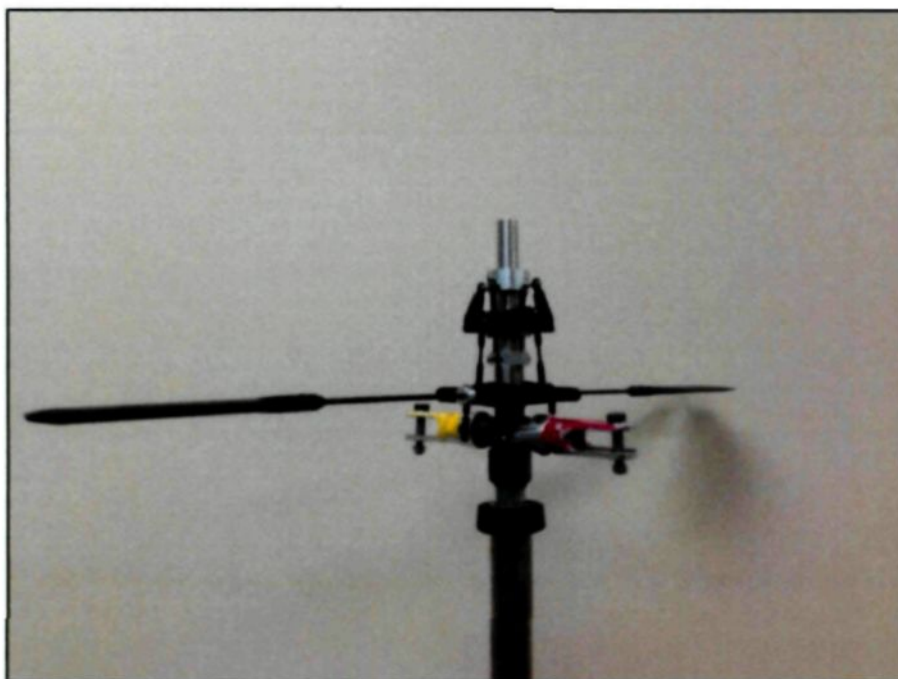


Figure 56 : Rotor du SRB

Le rotor de la Figure 56 provient d'un modèle réduit téléguidé pour les loisirs de la compagnie Hawkpro. Le rotor possède deux pales (non présentes sur cette figure) ainsi que deux stabilisateurs. Certaines modifications ont été effectuées pour réaliser les essais dans les conditions souhaitées. Par exemple, l'arbre principal a été remplacé par un arbre de diamètre supérieur de 12,7 mm et les bras qui maintiennent les pales ont également été modifiés pour permettre d'augmenter la vitesse de rotation initialement prévue sur le modèle de loisir. Avec le rotor, il est possible de faire varier l'angle de calage entre  $-10^{\circ}$  et  $10^{\circ}$ . La variation de l'angle s'effectue manuellement et ne peut donc être effectuée pendant les essais. Pour tous les essais effectués avec le SRB dans cet ouvrage, l'angle de calage est de  $6^{\circ}$  tel que suggéré par tous les précédents ouvrages utilisant le SRB.



### C.2.3 Les pales

Les pales utilisées pour le SRB sont en aluminium 6063-T6 et trois types de surface seront étudiées dans ce mémoire, soient, une surface de pale non modifiée en 6063-T6 (Figure 57), une surface recouverte de Wearlon® (Figure 58) et une surface d'aluminium 6063-T6 gravé chimiquement avec de l'acide chlorhydrique afin de la rendre plus rugueuse (Figure 59). Le profil de la pale extrudée est un NACA-0012. Les pales mesurent 331,2 mm d'une extrémité et l'autre, pour une corde de 69,83 mm. Lorsqu'elles sont installées, l'extrémité de la pale se trouve à une distance de 391,2 mm de l'axe de rotation.

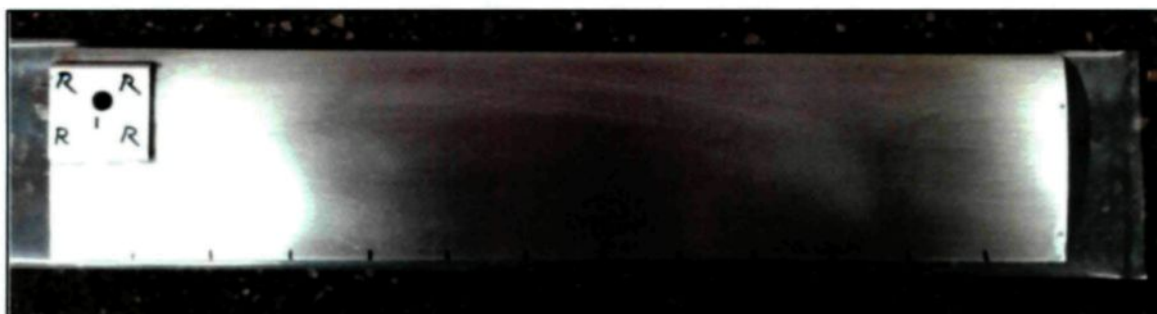


Figure 57 : Pale d'aluminium 6063-T6

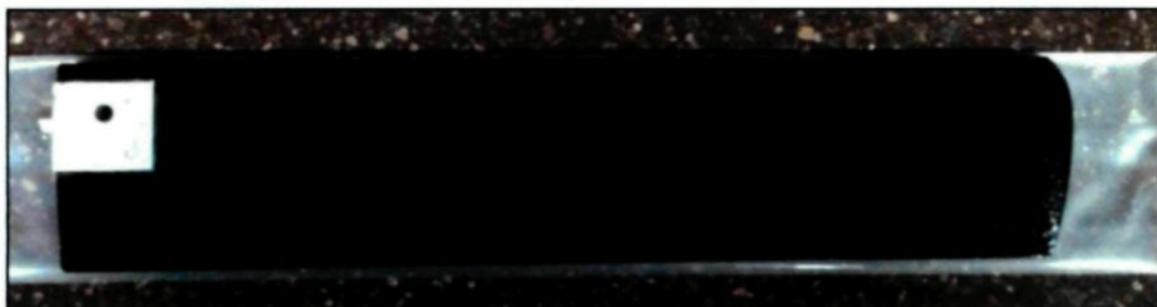


Figure 58 : Pale d'aluminium recouverte de Wearlon®

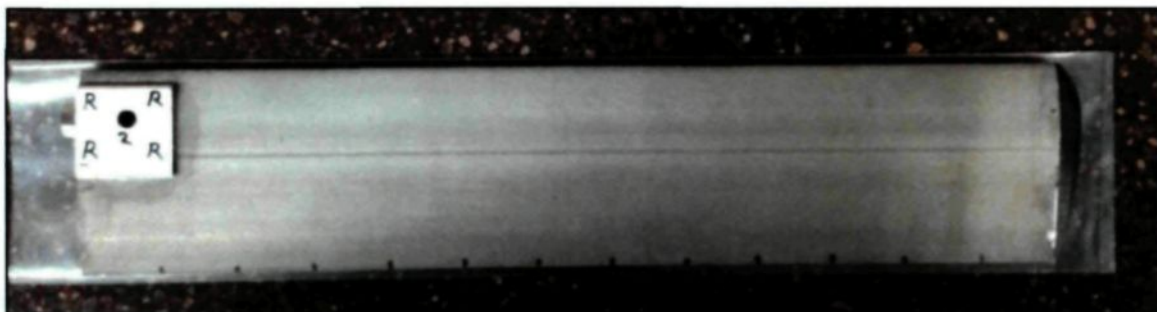


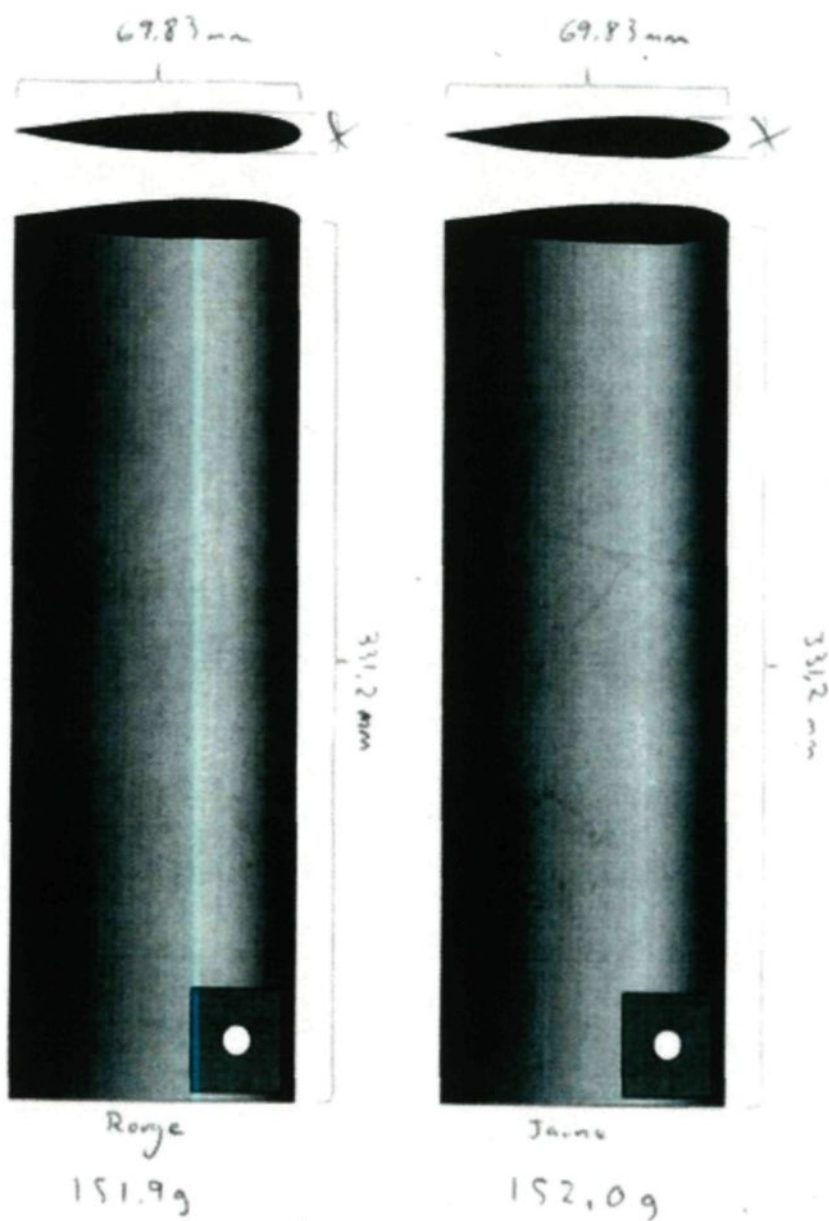
Figure 59 : Pale d'aluminium gravé chimiquement

#### C.2.4 Dimensions des pales

##### Pales d'aluminium 6063-T6

Set. 2

Alu - m Sous glace

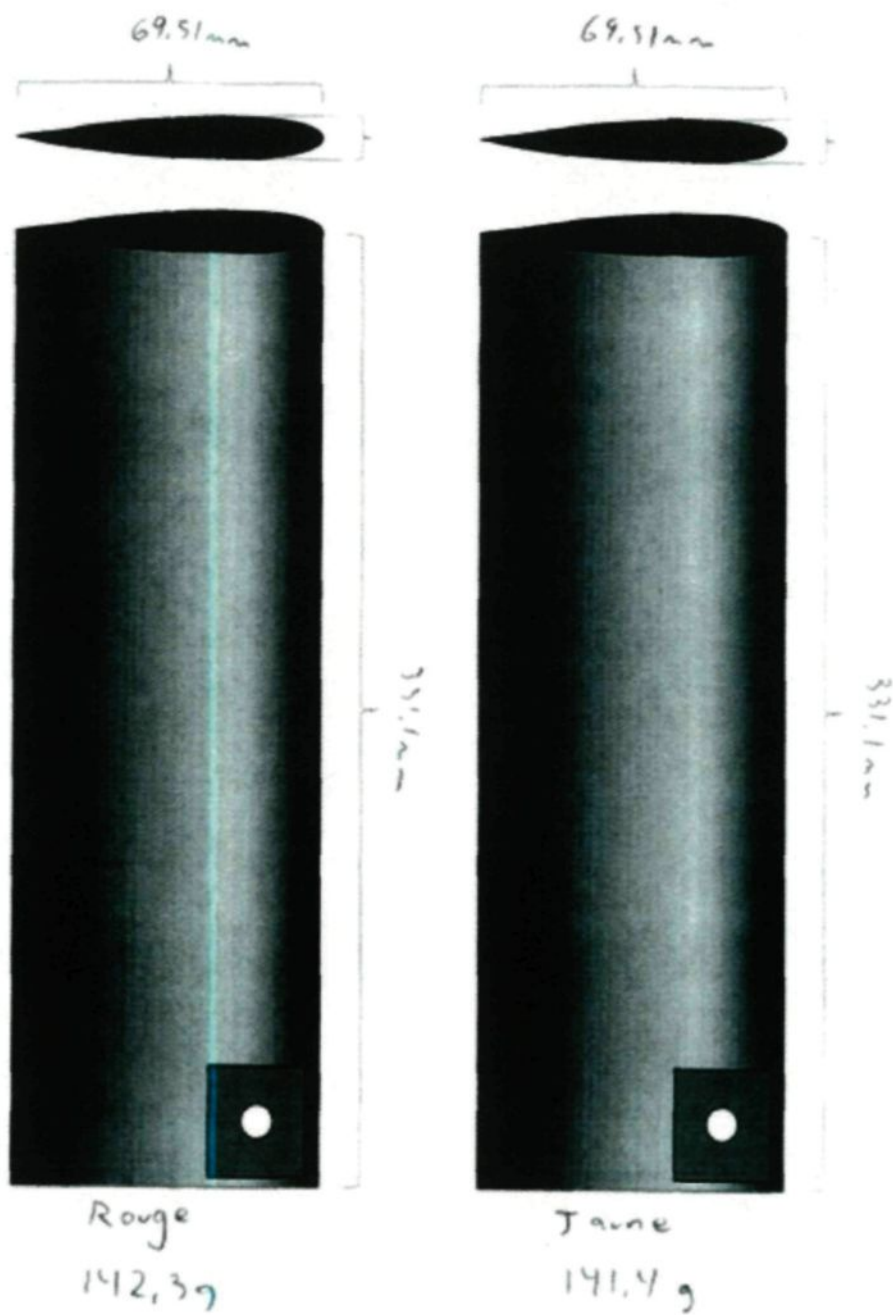




Pales d'aluminium gravé

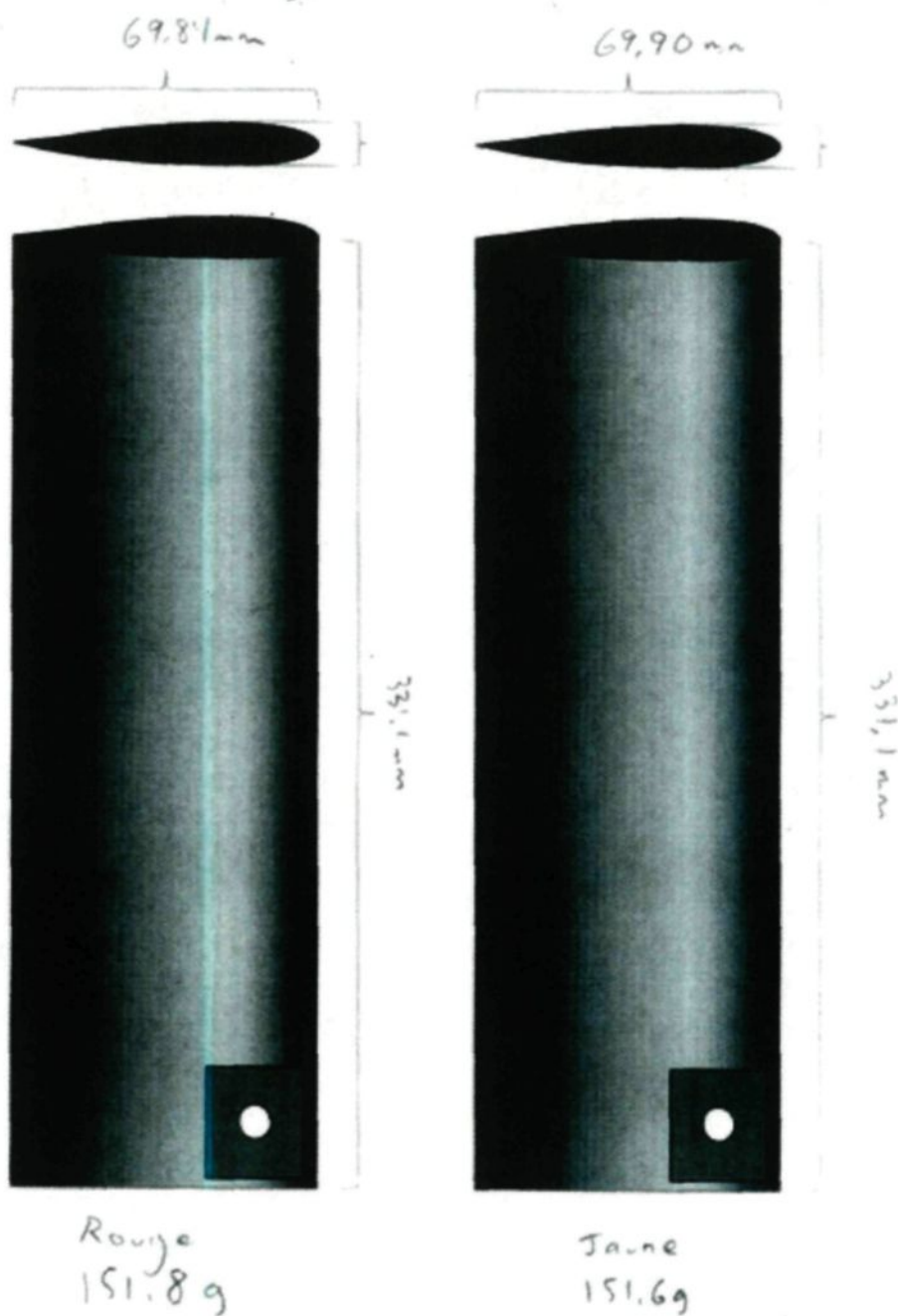
Set: 1

Aluminium arête sans glorie



Pales de Wearlon®

Set: 1  
Wearlon sans glaire / 69777



### C.2.5 Programme d'exploitation informatique

Un système d'acquisition de données est utilisé pour enregistrer les données. Celui-ci se compose d'une carte d'acquisition National Instrument de 100 kb/s avec 16 canaux et d'un ordinateur AMD Sempron 3400 équipé d'un processeur de 1,8 GHz. Les paramètres enregistrés sont : la vitesse de l'écoulement et la température dans la soufflerie, la puissance consommée par le moteur du SRB, la vitesse de rotation du rotor et le débit d'eau à la sortie du réservoir. Un programme a été développé au LIMA pour faciliter la réalisation des essais, l'interface est visible sur la Figure 60.

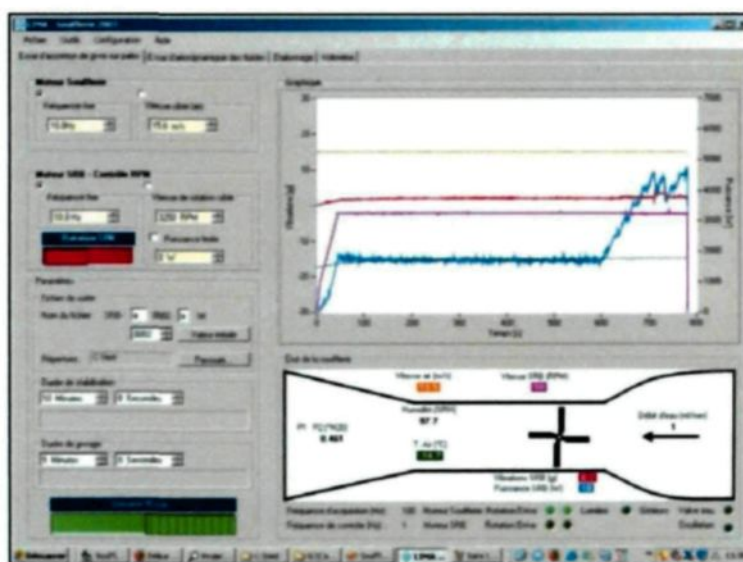


Figure 60 : Interface du programme de contrôle de la soufflerie réfrigérée et du SRB

Enfin, un stroboscope synchronisé avec la vitesse de rotation de la pale permet de filmer les essais grâce à une caméra fixée sur le dessus de la section d'essai.

### C.3 Description d'un essai avec le SRB en soufflerie réfrigérée

Les essais ont été réalisés à pour une plage de températures de l'air dans la soufflerie variant de -5 à -25 °C. La procédure des essais se divise en plusieurs étapes, regroupées en quatre opérations principales. La première opération consiste à régler la température de la soufflerie, la seconde opération est de régler la rampe des gicleurs, la troisième opération est d'effectuer un essai et enfin la dernière opération est d'enregistrer les informations obtenues. Les différentes opérations à réaliser pour un essai standard vont maintenant être détaillées de façons plus précises :

1. Les étapes qui suivent servent à régler la température de la soufflerie pour une journée. Elles doivent être faites deux heures avant le début des essais.
  - a. Allumer l'ordinateur, démarrer le logiciel de contrôle et régler la vitesse d'écoulement de l'air à la valeur souhaité via l'interface.
  - b. Régler la température de l'air dans la soufflerie via l'interface de contrôle, et la température du compresseur en fonction de la température et de la vitesse de l'air dans la soufflerie.
  - c. Allumer le compresseur du système de refroidissement.
  - d. Laisser la soufflerie en fonctionnement jusqu'à ce que le voyant vert de l'interface de contrôle s'allume pour signaler que la température cible est atteinte et stable.
2. L'étape suivante sert à ajuster la rampe de gicleur utilisée pour simuler la teneur en eau liquide (LWC) et le diamètre moyen des gouttelettes (MVD) présente dans un nuage. Cette étape est réalisée parallèlement à la précédente.

- a. Allumer le système de chauffage de la rampe de gicleur.
  - b. Régler le réservoir d'eau à une pression de 552 kPa.
  - c. Brancher les circuits d'air et d'eau sur le réservoir et ouvrir le circuit d'eau.
  - d. Ajuster les débitmètres pour obtenir la teneur en eau liquide souhaitée.
  - e. Ajuster la pression de l'air dans les gicleurs pour obtenir le diamètre moyen de gouttelettes souhaité.
3. L'étape suivante simule le givrage d'un hélicoptère avec le SRB.
- a. Polir les pales avec un Scotch Brite fin de 3M et les nettoyer à l'éthanol pour enlever les particules d'aluminium.
  - b. Fixer ensuite les pales sur les mains d'accroche du rotor.
  - c. Fermer la porte de la section d'essai et réactiver les boutons de sécurité
  - d. Ajuster le temps de stabilisation et le temps de givrage dans le programme d'interface.
  - e. Choisir le nom de l'essai et le dossier d'enregistrement du fichier.
  - f. Choisir la vitesse de rotation du SRB dans l'interface du programme puis attendre que la température et la vitesse dans la section d'essai soient stabilisées dans la section d'essai.
  - g. Démarrer l'essai.

Le démarrage de l'essai démarre simultanément le moteur du rotor et l'acquisition de données ainsi que le stroboscope. Afin que la température de surface sur les pales soit la même que la température de l'air, celles-ci tournent sans précipitation pendant 10 minutes.

Puis, les gicleurs sont activés et le givrage est maintenu jusqu'à ce que le poids de glace accrétée soit suffisamment élevé pour que l'une des pales se déglace sous l'effet de la force centrifuge.

4. La dernière étape consiste à enregistrer les informations issues de l'essai et à préparer le suivant.
  - a. Désactiver les boutons de sécurité.
  - b. Ouvrir la section d'essai et prendre les pales en photos sous les quatre différentes vues.
  - c. Mesurer l'épaisseur de glace accumulée à chaque poutre sur les pales à l'aide d'un pied à coulisse.
  - d. Détacher les pales du rotor et les peser sur la balance puis les laisser fondre.
  - e. Déglacer le rotor à l'aide d'un fusil thermique.
  - f. Faire sécher les pales à l'aide d'air comprimé.
  - g. Recommencer à l'étape 3.a.

#### **C.4 Paramètres mesurés lors d'un essai**

##### **C.4.1 Photographie**

A l'issue de chaque essai, des photographies sont réalisées sous quatre différentes vues de la pale. Ces photographies permettent de s'assurer que l'essai réalisé est bien semblable aux autres. Elles permettent aussi de garder une trace visuelle de l'apparence de la pale à la

fin de l'essai. Étant donnée le grand nombre de photographies, celles-ci ne sont pas présentées dans ce document.

#### **C.4.2 Masse de glace**

Après un essai, chaque pale est pesée puis en faisant la différence avec la masse de la pale sans glace, la masse de glace accrétée sur chaque pale est connue. Si l'accrétion de glace d'une seule pale s'est détachée, il est possible en faisant le différentiel de masse entre les deux accrétions de glace de déterminer la masse s'étant détachée. Cependant, la détermination de cette masse suppose une accrétion égale sur les deux pales. Cette approximation est légitime puisque les pales sont soumises aux mêmes conditions et captent donc autant d'eau l'une que l'autre. Les masses de glace sont déterminées à l'aide d'une balance de précision 0,1 g.

#### **C.4.3 Hauteur**

La mesure de la hauteur de glace accrétée est réalisée à l'aide d'un pied à coulisse d'une précision de 0,02 mm préalablement réfrigérée. La première mesure se fait à 25 mm de l'extrémité de la pale et puis tous les 50 mm jusqu'à l'attache du rotor.

#### **C.4.4 Longueur de délestage**

La mesure de la longueur de délestage est effectuée avec le même pied à coulisse que celui utilisé pour la mesure de la hauteur de la glace.

## **C.5 Mesures expérimentales brutes (SRB)**

### **C.5.1 Essais de délestage**



## Essais Aluminium SRB

Nom de l'essai	Date	Heure	Substrat	Air		Eau		Rotation	AOA	Rupture								
				Speed m/s	Temp °C	LWC g/m³	MVD µm			RPM	deg	Temps		Longueur délestée		Masse délestée g	Cisaillement critique Mpa	Incertitude Mpa
												min	sec	Jaune (mm)	Rouge (mm)			
srb-AI_5_0001_3200	2013-04-08	9h20	Alu	15,0	-5,1	0,7	27	3200	6,0	00:03:08	188	184,5	-	6,3	0,209	0,056		
srb-AI_5_0002_3200	2013-04-08	10h00	Alu	15,0	-5,2	0,7	27	3200	6,0	00:02:46	166	154,1	180,02	-	-	-		
srb-AI_5_0003_3200	2013-04-08	10h45	Alu	15,0	-5,2	0,7	27	3200	6,0	00:03:01	181	189,02	-	6	0,195	0,053		
srb-AI_10_0002_3200	2013-04-09	13h40	Alu	15,0	-10,0	0,7	27	3200	6,0	00:02:12	132	-	50,82	2,8	0,281	0,076		
srb-AI_10_0003_3200	2013-04-09	14h20	Alu	15,0	-10,0	0,7	27	3200	6,0	00:02:01	121	81,32	82,74	-	-	-		
srb-AI_10_0004_3200	2013-04-09	15h00	Alu	15,0	-10,0	0,7	27	3200	6,0	00:02:11	131	-	104,52	4,5	0,215	0,058		
srb-AI_15_0001_3200	2013-03-20	8h24	Alu	15,0	-15,2	0,7	27	3200	6,0	00:02:24	144	73,9	-	4,9	0,451	0,122		
srb-AI_15_0002_3200	2013-03-20	9h36	Alu	15,0	-15,2	0,7	27	3200	6,0	00:02:27	147	15,34	-	2,3	0,801	0,216		
srb-AI_15_0003_3200	2013-03-20	10h34	Alu	15,0	-15,3	0,7	27	3200	6,0	00:01:57	117	-	77,62	3,5	0,319	0,086		
srb-AI_20_0004_3200	2013-04-03	13h30	Alu	15,0	-19,9	0,7	27	3200	6,0	00:02:05	125	-	51,32	2,5	0,335	0,090		
srb-AI_20_0005_3200	2013-04-03	14h00	Alu	15,0	-19,9	0,7	27	3200	6,0	00:02:36	156	56,36	55	-	-	-		
srb-AI_20_0006_3200	2013-04-04	8h30	Alu	15,0	-20,1	0,7	27	3200	6,0	00:02:04	124	13,78	22,58	-	-	-		
srb-AI_20_0007_3200	2013-10-28	8h45	Alu	15,0	-20,0	0,7	27	3200	6,0	00:03:11	191.53	39,21	-	4,4	0,792	0,214		
srb-AI_20_0008_3200	2013-10-28	9h25	Alu	15,0	-20,0	0,7	27	3200	6,0	00:02:28	148.94	-	46,63	3,3	0,497	0,134		
srb-AI_20_0010_3200	2013-10-29	9h10	Alu	15,0	-20,0	0,7	27	3200	6,0	00:01:38	98.65	70,61	-	3,9	0,403	0,109		
srb-AI_25_0001_3200	2013-04-12	9h35	Alu	15,0	-24,8	0,7	27	3199	6,0	00:04:22	262	32,2	-	7,8	1,782	0,481		
srb-AI_25_0002_3200	2013-04-12	10h40	Alu	15,0	-24,6	0,7	27	3200	6,0	00:03:46	226	47	36,72	-	-	-		
srb-AI_25_0004_3200	2013-04-16	9h35	Alu	15,0	-24,9	0,7	27	3200	6,0	00:02:48	168	-	33,82	8	1,814	0,490		
srb-AI_15_38_0001_3200	2013-04-15	13h30	Alu	15,0	-15,1	0,8	38	3200	6,0	00:02:46	166	-	52,28	4,6	0,375	0,101		
srb-AI_15_38_0002_3200	2013-04-15	14h15	Alu	15,0	-15,2	0,8	38	3200	6,0	00:02:59	179	-	42,8	5,8	0,358	0,097		
srb-AI_15_0001_1600	2013-03-25	8h37	Alu	15,0	-15,3	0,7	27	1601	6,0	00:12:23	743	117,06	-	42,8	0,511	0,138		
srb-AI_15_0002_1600	2013-03-25	9h30	Alu	15,0	-15,3	0,7	27	1600	6,0	00:08:48	528	-	28,88	6,6	-	-		
srb-AI_15_0003_1600	2013-03-25	10h35	Alu	15,0	-15,2	0,7	27	1600	6,0	00:13:24	804	115,06	-	47,1	0,584	0,158		

## Essais Aluminium attaqué SRB

Nom de l'essai	Date	Heure	Substrat	Air		Eau		Rotation	AOA	Rupture						
				Speed m/s	Temp °C	LWC g/m³	MVD µm			Temps min    sec		Longueur délestée Jaune (mm)    Rouge (mm)		Masse délestée g	Cisaillement critique Mpa	Incertitude Mpa
srb-AIAC_5_0001_3200	2013-04-08	13h15	Alu. Att.	15,0	-5,1	0,7	27	3200	6,0	00:05:40	340	7,14	49,32	-	-	-
srb-AIAC_5_0002_3200	2013-04-08	13h50	Alu. Att.	15,0	-5,0	0,7	27	3200	6,0	00:05:39	339	39,04	-	2	0,139	0,038
srb-AIAC_5_0003_3200	2013-04-09	8h00	Alu. Att.	15,0	-5,0	0,7	27	3200	6,0	00:04:36	276	14,78	21,1	-	-	-
srb-AIAC_10_0001_3200	2013-04-09	11h40	Alu. Att.	15,0	-10,0	0,7	27	3199	6,0	00:04:17	257	-	-	-	-	-
srb-AIAC_10_0002_3200	2013-04-10	12h30	Alu. Att.	15,0	-10,1	0,7	27	3199	6,0	00:04:17	257	-	-	-	-	-
srb-AIAC_15_0006_3200	2013-03-20	13h25	Alu. Att.	15,0	-15,1	0,7	27	3200	6,0	00:03:15	195	70,76	65,16	-	-	-
srb-AIAC_15_0007_3200	2013-03-21	8h11	Alu. Att.	15,0	-15,1	0,7	27	3200	6,0	00:04:14	254	77,87	86	-	-	-
srb-AIAC_15_0009_3200	2013-03-21	14h00	Alu. Att.	15,0	-15,1	0,7	27	3200	6,0	00:03:38	218	67	37,32	-	-	-
srb-AIAC_20_0001_3200	2013-04-04	9h20	Alu. Att.	15,0	-20,1	0,7	27	3200	6,0	00:02:51	171	46,52	12,26	-	-	-
srb-AIAC_20_0002_3200	2013-04-04	10h00	Alu. Att.	15,0	-20,2	0,7	27	3200	6,0	00:03:11	191	25,92	24,62	-	-	-
srb-AIAC_20_0004_3200	2013-04-04	13h30	Alu. Att.	15,0	-20,1	0,7	27	3200	6,0	00:03:18	198	-	33,16	2,9	0,440	0,119
srb-AIAC_25_0001_3200	2013-04-16	10h35	Alu. Att.	15,0	-24,5	0,7	27	3200	6,0	00:06:11	371	19	51,58	-	-	-
srb-AIAC_25_0002_3200	2013-04-16	13h00	Alu. Att.	15,0	-25,0	0,7	27	3200	6,0	00:03:10	190	-	49,56	5,4	0,664	0,179
srb-AIAC_25_0003_3200	2013-04-16	14h30	Alu. Att.	15,0	-24,0	0,7	27	3200	6,0	00:06:10	370	19,32	38	-	-	-
srb-AIAC_15_0002_1600	2013-03-20	14h50	Alu. Att.	15,0	-15,3	0,7	27	1600	6,0	00:18:13	1093	123,4	69,82	-	-	-
srb-AIAC_15_0004_1600	2013-03-21	10h30	Alu. Att.	15,0	-15,2	0,7	27	1600	6,0	00:11:26	686	31,1	40,72	-	-	-
srb-AIAC_15_0005_1600	2013-03-21	8h30	Alu. Att.	15,0	-15,2	0,7	27	1600	6,0	00:13:39	819	49,44	76,64	-	-	-



## Essais Wearlon® SRB

Nom de l'essai	Date	Heure	Substrat	Air		Eau		Rotation	AOA	Rupture						
				Speed m/s	Temp °C	LWC g/m³	MVD µm			Temps min sec		Longueur délestée Jaune (mm) Rouge (mm)		Masse délestée g	Cisaillement critique Mpa	Incertitude Mpa
srb-W_5_0001_3200	2013-04-09	9h10	Wearlon®	15,0	-5,2	0,7	27	3199	6,0	00:01:32	92	83,14	99,94	-	-	-
srb-W_5_0002_3200	2013-04-09	9h45	Wearlon®	15,0	-5,2	0,7	27	3200	6,0	00:01:26	86	-	105,44	1,1	0,036	0,010
srb-W_5_0003_3200	2013-04-09	10h40	Wearlon®	15,0	-5,2	0,7	27	3200	6,0	00:01:50	110	-	92,92	1,5	0,057	0,015
srb-W_10_0001_3200	2013-04-10	13h10	Wearlon®	15,0	-10,1	0,7	27	3201	6,0	00:01:27	87	-	50,42	2	0,206	0,056
srb-W_10_0002_3200	2013-04-10	14h00	Wearlon®	15,0	-10,0	0,7	27	3200	6,0	00:01:34	94	50,84	52	-	-	-
srb-W_10_0003_3200	2013-04-10	14h25	Wearlon®	15,0	-10,1	0,7	27	3200	6,0	00:01:31	91	-	63,62	2,5	0,201	0,054
srb-W_15_0001_3200	2013-03-22	8h25	Wearlon®	15,0	-15,2	0,7	27	3201	6,0	00:00:41	41	96,48	76,18	-	-	-
srb-W_15_0002_3200	2013-03-22	9h22	Wearlon®	15,0	-15,2	0,7	27	3200	6,0	00:00:47	47	45,28	55,1	-	-	-
srb-W_15_0003_3200	2013-03-22	10h00	Wearlon®	15,0	-15,1	0,7	27	3201	7,0	00:00:50	50	34,58	55,7	-	-	-
srb-W_20_0001_3200	2013-04-05	8h20	Wearlon®	15,0	-20,2	0,7	27	3199	6,0	00:01:41	101	-	98,5	4,6	0,335	0,090
srb-W_20_0002_3200	2013-04-05	9h10	Wearlon®	15,0	-20,1	0,7	27	3200	6,0	00:01:32	92	-	44,26	2,8	0,433	0,117
srb-W_20_0003_3200	2013-04-05	10h00	Wearlon®	15,0	-20,1	0,7	27	3200	6,0	00:01:42	102	28,26	-	1,1	0,165	0,045
srb-W_25_0001_3200	2013-04-17	9h20	Wearlon®	15,0	-24,9	0,7	27	3200	6,0	00:02:45	165	-	44,06	5,4	0,841	0,227
srb-W_25_0002_3200	2013-04-17	10h10	Wearlon®	15,0	-24,8	0,7	27	3199	6,0	00:02:06	126	29,46	-	2,1	0,376	0,102
srb-W_25_0003_3200	2013-04-17	11h00	Wearlon®	15,0	-24,7	0,7	27	3200	7,0	00:02:15	135	28,88	-	2,6	0,544	0,147
srb-W_15_0001_1600	2013-04-03	9h30	Wearlon®	15,0	-15,1	0,7	27	1600	6,0	00:07:10	430	108,84	-	17,8	0,227	0,061
srb-W_15_0002_1600	2013-04-03	10h10	Wearlon®	15,0	-15,3	0,7	27	1600	6,0	00:07:32	452	117,14	-	19,3	0,223	0,060
srb-W_15_0003_1600	2013-04-03	11h05	Wearlon®	15,0	-15,3	0,7	27	1600	6,0	00:07:28	448	-	104,5	18,8	0,254	0,069

### **C.5.2 Hauteur d'accrétion de glace sur les essais de délestage**

#### **Aluminium**

Position Radiale mm	srb-AI_5_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_5_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_5_0003_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	2,99	-	-	-	3,05
366	-	4,09	-	-	-	3,77
340	-	3,67	-	-	-	3,73
315	-	3,85	-	-	-	3,55
289	-	3,57	-	-	-	3,09
264	-	2,97	-	-	-	3,31
238	-	3,43	-	-	-	2,97
213	-	2,85	2,53	-	-	2,67
187	2,97	2,63	2,43	2,45	2,55	2,5
162	2,53	2,51	2,25	2,27	2,39	2,39
136	2,43	2,43	2,19	2,09	2,29	2,27
111	2,27	2,27	2,01	2,01	2,17	2,17
85	1,49	1,53	1,27	1,29	1,45	1,53
60	1,05	0,95	0,81	0,81	0,89	0,89

Position Radiale mm	srb-AI_10_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_10_0003_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_10_0004_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	4,97	-	-	-	4,57	-
366	4,43	-	-	-	4,27	-
340	4,07	-	-	-	3,87	-
315	4,05	3,75	-	-	3,85	-
289	3,67	3,65	3,39	3,39	3,49	-
264	3,61	3,65	3,29	3,33	3,49	3,51
238	3,67	3,77	3,43	3,47	3,63	3,67
213	3,61	3,45	3,19	3,09	3,37	3,33
187	2,89	2,69	2,69	2,41	2,93	2,79
162	2,05	3,07	2,07	1,95	2,15	2,07
136	1,89	1,49	1,322	1,67	1,81	1,83
111	1,59	1,51	1,47	1,37	1,51	1,47
85	0,93	1,01	0,99	0,89	0,89	0,89
60	0,61	0,61	0,49	0,59	0,57	0,61

Position Radiale mm	srb-AI_15_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_15_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_15_0003_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	8,37	-	8,77	7,69	-
366	-	7,75	8,67	7,05	6,41	-
340	-	6,85	6,97	5,47	6,15	-
315	7,09	6,34	6,27	5,05	4,39	-
289	6,03	6,05	5,17	4,45	3,43	4,33
264	4,45	4,68	4,83	4,45	3,65	3,99
238	4,55	5,09	4,94	4,97	3,95	4,13
213	4,27	3,69	4,51	3,85	3,53	3,49
187	3,35	3,09	3,45	3,19	2,79	2,79
162	2,47	2,45	2,55	2,31	3,05	2,11
136	2,17	2,39	2,25	2,37	1,59	1,87
111	1,83	1,97	1,98	2,09	1,59	1,73
85	1,21	1,31	1,27	1,49	0,97	0,99
60	0,77	0,81	0,69	0,77	0,55	0,57

Position Radiale mm	srb-AI_20_0004_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_20_0005_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_20_0006_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	8,97	-	-	-	-	-
366	7,99	-	-	-	8,57	8,89
340	6,51	-	-	-	6,85	6,91
315	6,03	5,87	7,29	7,31	6,01	6,17
289	4,33	4,21	5,39	5,27	4,39	4,35
264	3,87	4,09	4,79	5,07	4,03	4,17
238	4,15	4,43	5,19	5,37	4,29	4,63
213	3,55	3,21	4,81	4,23	3,41	3,21
187	2,87	2,75	3,49	3,37	2,77	2,79
162	1,91	1,95	2,29	2,31	1,99	1,81
136	1,59	1,75	2,06	2,09	1,67	1,69
111	1,41	1,61	1,81	1,83	1,57	1,67
85	0,744	0,93	0,86	1,07	0,79	0,97
60	0,39	0,43	0,43	0,59	0,51	0,53

Position Radiale mm	srb-AI_25_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_25_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_25_0004_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	22,09	-	-	15,13	-
366	-	19,47	-	-	13,41	-
340	13,93	13,93	13,71	13,79	10,19	10,31
315	12,27	11,71	12,07	12,23	9,25	8,69
289	8,65	8,63	8,85	8,85	6,49	6,21
264	8,09	8,49	8,19	7,81	6,15	6,31
238	8,17	8,87	8,79	8,29	6,57	7,35
213	6,17	6,03	5,19	6,57	5,79	4,61
187	4,75	4,59	5,27	5,35	4,23	4,07
162	2,97	2,97	3,85	3,87	2,77	2,79
136	2,37	2,35	3,47	3,33	2,45	2,51
111	2,07	2,17	3,13	2,91	2,17	2,25
85	0,89	1,09	1,85	1,67	1,09	1,21
60	0,53	0,53	1,15	1,13	0,73	0,77

Position Radiale mm	srb-AI_15_0001_1600 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_15_0002_1600 Hauteur de glace (mm)		srb-AI_15_0003_1600 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	29,15	21,31	-	-	30,41
366	-	29,01	21,35	-	-	29,65
340	-	28,97	20,39	20,19	-	29,83
315	-	26,57	18,65	18,97	-	27,93
289	-	23,99	16,33	16,29	-	24,55
264	20,71	20,87	14,09	13,97	21,27	21,59
238	17,37	16,65	12,03	11,95	18,17	17,79
213	14,99	14,45	10,05	9,75	15,47	15,11
187	12,45	11,99	8,09	7,93	12,49	12,41
162	8,65	8,37	5,49	5,49	8,99	8,65
136	6,29	6,17	3,99	3,95	6,49	6,37
111	4,91	4,57	3,15	2,97	4,97	4,67
85	3,37	3,17	2,19	2,05	3,47	3,37
60	2,41	2,25	1,53	1,39	2,47	2,45

**Aluminium Gravé**

Position Radiale mm	srb-AIAC_5_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_5_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_5_0003_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	-	-	5,99	-	-
366	7,01	-	-	6,71	3,99	4,39
340	6,79	7,41	6,57	7,37	5,17	4,91
315	6,93	7,89	6,65	7,13	5,57	6,07
289	6,31	6,13	5,71	6,59	4,51	4,81
264	5,85	5,51	6,21	6,19	4,57	4,31
238	5,79	6,19	6,09	5,77	4,59	5,25
213	6,09	5,61	5,95	5,61	4,47	4,33
187	4,75	5,09	4,97	5,09	3,93	3,89
162	4,23	4,41	4,49	4,69	3,69	3,71
136	4,15	4,19	4,17	4,01	3,35	4,45
111	3,91	3,81	3,79	3,79	3,03	3,01
85	2,61	2,65	2,65	2,67	1,97	2,09
60	1,69	1,79	1,69	1,65	1,21	1,37

Position Radiale mm	srb-AIAC_10_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_10_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_15_0006_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	-	-	-	-	-
366	-	-	-	-	-	-
340	-	-	-	-	-	-
315	-	-	-	-	8,87	9,21
289	-	-	-	-	7,75	7,91
264	-	-	-	-	6,89	6,93
238	-	-	-	-	6,69	6,71
213	-	-	-	-	5,89	6,09
187	-	-	-	-	4,61	4,99
162	-	-	-	-	3,69	3,71
136	-	-	-	-	7,15	3,17
111	-	-	-	-	2,51	2,67
85	-	-	-	-	1,49	1,75
60	-	-	-	-	0,97	1,01

Position Radiale mm	srb-AIAC_15_0007_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_15_0009_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_20_0001_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	-	-	-	-	-
366	-	-	-	-	-	11,29
340	-	-	-	10,65	9,17	9,31
315	-	-	9,97	10,27	8,35	8,35
289	10,33	10,49	8,13	8,21	5,87	6,19
264	9,35	9,47	7,15	7,49	5,49	5,55
238	8,91	8,01	7,25	7,25	6,01	6,17
213	7,77	7,88	6,47	6,03	5,79	4,63
187	6,61	6,49	5,01	4,97	3,85	3,75
162	5,09	5,03	3,97	3,77	2,69	2,45
136	4,35	4,49	3,37	3,39	2,23	2,31
111	3,41	3,69	2,73	2,73	1,91	1,93
85	2,21	2,43	1,65	1,77	0,99	1,07
60	1,41	1,51	0,97	1,15	0,65	0,61



Position Radiale mm	srb-AIAC_20_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_20_0004_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_25_0001_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	-	15,41	-	-	-
366	13,15	13,77	13,49	-	28,03	-
340	10,81	10,97	11,37	11,31	22,59	22,49
315	9,55	10,01	9,91	10,17	19,53	19,49
289	7,07	7,47	7,39	7,65	13,65	14,19
264	6,57	6,81	6,71	6,99	12,95	12,99
238	6,89	6,95	6,89	6,95	12,79	12,95
213	5,49	5,57	5,29	5,73	10,41	10,03
187	4,51	4,45	4,41	4,41	8,49	8,39
162	3,31	3,19	3,05	3,09	5,93	5,99
136	2,73	2,69	2,71	2,77	5,07	5,09
111	2,15	2,25	2,29	2,27	4,29	4,29
85	1,21	1,29	1,25	1,45	2,43	2,39
60	0,77	0,89	0,75	0,81	1,71	1,65

Position Radiale mm	srb-AIAC_25_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_25_0004_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_15_0002_1600 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	16,69	-	-	-	-	-
366	15,09	-	27,29	22,49	-	-
340	12,25	12,65	22,23	19,31	-	-
315	10,45	10,95	19,31	19,67	-	37,61
289	7,35	7,63	13,89	14,37	-	33,69
264	6,95	7,17	12,99	13,09	29,19	29,87
238	7,49	7,65	12,71	12,69	25,07	24,89
213	5,91	5,79	10,29	10,55	21,55	21,03
187	4,45	4,65	8,29	8,15	18,23	17,27
162	3,01	3,05	5,99	6,19	13,15	13,23
136	2,61	2,71	5,21	5,29	9,65	9,71
111	2,25	2,37	4,39	4,33	6,97	6,59
85	1,19	1,25	2,49	2,47	4,59	4,37
60	0,79	0,81	1,63	1,67	3,09	3,11

Position Radiale mm	srb-AIAC_15_0004_1600 Hauteur de glace (mm)		srb-AIAC_15_0005_1600 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	-	-	-
366	-	-	-	-
340	26,35	25,57	-	-
315	28,29	24,41	28,47	-
289	21,79	21,91	24,57	24,47
264	18,71	18,61	21,29	20,65
238	15,87	15,59	17,79	17,69
213	13,45	13,13	15,27	14,81
187	10,77	10,51	12,17	12,01
162	7,45	7,51	8,51	8,69
136	5,47	5,49	6,21	6,19
111	4,29	4,01	4,75	4,37
85	6,05	2,71	3,23	2,99
60	2,09	1,93	2,23	2,27

**Wearlon®**

Position Radiale mm	srb-W_5_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_5_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_5_0003_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	-	0,93	-	1,79	-
366	-	-	1,69	-	2,11	-
340	-	-	1,99	-	2,19	-
315	-	-	1,67	-	1,95	-
289	1,43	1,55	1,47	-	1,93	1,63
264	1,49	1,43	1,25	1,23	1,81	1,59
238	1,45	1,57	1,49	1,45	1,95	1,55
213	1,61	1,29	1,49	1,17	1,93	1,51
187	1,25	1,21	1,25	1,09	1,49	1,35
162	1,19	1,13	1,07	0,94	1,29	1,35
136	1,01	1,09	0,93	0,99	1,21	1,21
111	1,07	1,05	0,89	0,91	1,23	1,13
85	0,59	0,55	0,49	0,45	0,79	0,65
60	0,23	0,33	0,23	0,29	0,43	0,43

Position Radiale mm	srb-W_10_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_10_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_10_0003_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	2,83	-	-	-	3,23	-
366	2,67	-	-	-	2,93	-
340	2,53	2,55	-	-	2,75	-
315	2,45	2,59	2,87	2,81	2,73	2,65
289	3,43	2,41	2,75	2,47	2,63	2,39
264	2,35	2,29	2,55	2,53	2,45	2,37
238	2,33	2,33	2,53	2,63	2,55	2,47
213	2,25	2,17	2,19	2,41	2,53	2,13
187	1,95	1,81	2,23	1,99	2,11	1,89
162	1,37	1,33	1,53	1,53	1,45	1,31
136	1,13	1,07	1,35	1,29	1,15	1,11
111	0,97	0,89	1,25	1,11	1,11	1,03
85	0,51	0,53	0,85	0,51	0,67	0,51
60	0,37	0,33	0,41	0,33	0,39	0,35

Position Radiale mm	srb-W_15_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_15_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_15_0003_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	-	-	-	-	-
366	-	-	-	-	-	-
340	-	-	2,41	2,29	2,63	-
315	-	1,65	2,27	2,25	2,53	2,53
289	1,49	1,25	1,93	1,67	2,13	1,95
264	1,23	0,99	1,71	1,39	1,93	1,67
238	1,25	1,31	1,81	1,73	1,99	1,93
213	1,35	0,87	1,71	1,41	1,83	1,43
187	0,97	0,61	1,25	1,11	1,25	1,29
162	0,53	0,43	0,81	0,73	0,99	0,85
136	0,47	0,35	0,63	0,59	0,77	0,69
111	0,43	0,35	0,63	0,57	0,75	0,63
85	0,31	0,23	0,33	0,23	0,33	0,37
60	0,15	0,09	0,15	0,11	0,21	0,09

Position Radiale mm	srb-W_20_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_20_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_20_0003_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	7,37	-	7,09	-	-	7,73
366	6,73	-	6,55	-	-	7,15
340	6,05	-	5,99	5,57	6,21	5,95
315	5,29	-	5,25	5,13	5,69	5,37
289	4,09	3,63	3,95	3,49	4,27	3,83
264	3,59	3,29	3,65	3,27	3,71	3,53
238	3,57	3,79	3,71	3,57	3,95	3,85
213	3,17	2,65	3,33	2,61	3,55	2,77
187	2,53	2,15	2,41	2,15	2,53	2,23
162	1,61	1,35	1,55	1,47	1,63	1,55
136	1,37	1,29	1,27	1,33	0,19	1,33
111	1,31	1,15	1,23	1,23	1,31	1,21
85	1,01	0,63	1,03	0,63	0,89	0,59
60	0,27	0,33	0,39	0,33	0,43	0,27

Position Radiale mm	srb-W_25_0001_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_25_0002_3200 Hauteur de glace (mm)		srb-W_25_0003_3200 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	15,31	-	-	11,23	-	11,73
366	13,43	-	9,51	10,35	-	10,69
340	11,09	10,61	8,67	8,15	9,07	8,77
315	9,51	9,07	7,57	7,03	8,01	7,53
289	6,77	6,23	6,49	7,93	5,77	5,13
264	6,01	6,21	4,71	4,81	4,99	4,93
238	6,55	6,83	5,13	5,29	5,33	5,45
213	5,23	4,65	4,31	3,43	4,35	3,77
187	4,03	3,67	3,25	2,93	3,33	2,97
162	2,71	2,43	2,07	1,93	2,05	1,85
136	2,33	2,19	1,81	1,75	1,75	1,77
111	2,07	1,97	1,67	1,53	1,59	1,55
85	1,31	0,87	1,03	0,83	1,17	0,83
60	0,73	0,53	0,57	0,43	0,53	0,53

Position Radiale mm	srb-W_15_0001_1600 Hauteur de glace (mm)		srb-W_15_0002_1600 Hauteur de glace (mm)		srb-W_15_0003_1600 Hauteur de glace (mm)	
	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge	Pale Jaune	Pale Rouge
391	-	17,71	-	17,93	17,65	-
366	-	16,97	-	17,11	17,81	-
340	-	16,31	-	16,99	17,19	-
315	-	15,01	-	16,05	15,95	-
289	-	13,37	-	14,01	14,11	-
264	11,65	11,25	12,51	12,25	11,93	11,95
238	9,81	9,47	10,41	10,07	10,15	9,75
213	8,23	7,71	8,61	8,37	8,31	8,03
187	6,73	6,41	7,07	6,67	6,63	6,37
162	4,71	4,27	5,05	4,47	4,57	4,33
136	3,27	2,99	3,31	3,21	3,11	2,83
111	2,37	2,33	2,59	2,49	2,25	2,39
85	1,65	1,59	1,75	1,91	1,63	1,59
60	1,27	1,13	1,15	1,21	1,15	1,07